国家社科基金
GUOJIA SHEKE JIJIN HUQI ZIZHU XIANGMU
后期资助项目

频谱音乐的基本原理

Radical Principle of Spectral Music

肖武雄 著

文化藝術出版社
Culture and Art Publishing House

国家社科基金后期资助项目
出版说明

后期资助项目是国家社科基金设立的一类重要项目，旨在鼓励广大社科研究者潜心治学，支持基础研究多出优秀成果。它是经过严格评审，从接近完成的科研成果中遴选立项的。为扩大后期资助项目的影响，更好地推动学术发展，促进成果转化，全国哲学社会科学规划办公室按照“统一设计、统一标识、统一版式、形成系列”的总体要求，组织出版国家社科基金后期资助项目成果。

全国哲学社会科学规划办公室

内容摘要

本书的目的是为了研究频谱音乐的基本原理，以第一代频谱乐派作曲家杰勒德·格瑞瑟、提斯坦·缪哈耶的作品为研究重点，辅助于第二代已经具有国际影响力的“后频谱”作曲家的作品为佐证，深入探讨他们作品中反映出来的声学原理；借助电子仪器、电脑频谱分析来揭示构成这些作品的声音本质；探求他们把声学、电子理论运用于常规传统乐器的经验成果，并按照人们习惯的音乐“术科”分类标准进行归纳、综合出频谱音乐的旋律形态、和声建构、复调特征、曲式原则、配器原则等方面的“新”成果，总结出频谱音乐作品的组织结构特性。

本书结构分为上、中、下三篇。其中上篇为“理论建模与运用”，分为《频谱基础》、《泛音的作用》、《音乐的结构力因素》、《频谱音乐的音高素材》、《频谱音乐的声音合成原理》五章内容；中篇为“结构形态与原则”，按照音乐“术科”分类标准归纳出六章内容；下篇为“原理运用与实践”，选取法国频谱音乐以外的六部作品为例，检验这一理论成果对于不同风格、不同国籍，尤其是对于中国作曲家的创作实践的指导意义，探索它对创作前的案头准备、创作后的音乐形态等领域运用的科学性、艺术性、适度性。同时附有十二个附录，涉及计算公式、实验数据、频谱语图、相关定律、谱例图形和作曲家作品索引信息，它们是本书论证的重要论据，其中出现了音乐家们较少涉及的数理、声学专业术语，它们同样是不可省略、科学的推理依据。

本书是以作者在上海音乐学院研读博士的学位论文《频谱音乐的组织结构》为基础的延伸课题，文本的完成是作者在导师徐孟东先生的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，文本不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体均已在文中以明确方式标明。

延伸课题《频谱音乐的基本原理》先后得到2009年国家教育部人文社会科学研究项目基金资助（项目批号：09YJA760031），以及2011年国家哲学社会科学后期资助项目基金资助（项目批号：11FYS003），并利用首都师范大学的资源优势，强势互补，呈现在此的著作是作者持续七年研究的结晶。

序

徐孟东

肖武雄先生在其博士论文《频谱音乐的组织结构》的基础上进一步修改完善、深化研究、系统论述的专著《频谱音乐的基本原理》即将出版之际嘱我作序，我认为自己并不是合适的作序之人，从学问、学养、学术到资历等各方面而言都如此，因此极少给人作序。

但集肖武雄耗数年精血研究法国频谱音乐之所得的重要成果《频谱音乐的基本原理》，确实记录见证了进入21世纪后，中国作曲与作曲技术理论界诸如肖武雄这样的一批新人，解放思想，开拓视野，对一些影响广泛的当代重要艺术流派、作曲家及其技法、作品，给予认真关注并进行深入系统探究，进而推出具有补白意义和一定创新性成果这样的真实历史过程。我本人作为肖武雄的导师，也因此在这一过程中比较全面系统地学习、分析、研究了频谱音乐理论和代表作品，并尝试将其一些音响音色概念用于自身的创作实践，故而获益良多。所以，不揣绵薄之力而为之作序。希望肖武雄先生的研究成果出版后，能进一步引起人们对频谱音乐理论与实践的关注，加强东西方当代艺术交流，促进中国现代音乐创作和理论研究深入健康发展。

我想，解析音响的本源，寻求音色的内涵构成，揭示声音的本质特性，从而使音乐以最接近其自然状态的形式呈现给人们，可以说是频谱音乐形成、发展并获得日益广泛影响的根本原因。正是基于这样的音乐美学观点，格瑞瑟、缪哈耶等人才能深刻思考，潜心研究，借助数学、物理（声学）理论奠定其构成基础，运用现代各类科技特别是声学技术、电子技术作为其分析、研究直至创作、演奏的手段与方式，并最终在某种意义上实现了他们的理想，把声音“作为一个赋予生命的事物”。也因此他们在波澜壮阔、异彩纷呈的20世纪行将结束的十余年里，为现当代音乐历史涂抹了色彩最为鲜明独特的一笔，并以此迎来了世界乐坛新的百年。

我认为，从美学思想上研究，频谱音乐似乎与新古典主义有更多相通之处。因为他们都主张音乐作品的宁静、客观、自然、自律、自在等；从形式上体察，频谱音乐实际上是现代音乐开创性人物勋伯格所建立的“音色音乐”更深层面的延续与发展，尽管频谱音乐作曲家们可能并不认同这

一点甚至还曾反对过勋伯格开创的序列主义音乐；从历史、艺术传统乃至一些频谱音乐作品的标题性、色彩性来观照，频谱音乐无疑又和法国印象主义音乐有着千丝万缕的内在、外在联系。凡此种种，还真的让人很难对频谱音乐的流派属性、概念做一个准确的界定。并且就连格瑞瑟、缪哈耶等人对此也未能达成一致，甚至连对“频谱音乐”这个概念都没能完全认同，而只是期冀在他们的继续努力下，有朝一日频谱音乐也会和序列主义、印象主义、新古典主义一样，成为一种实在的主义和流派。

但唯其如此，才使得频谱音乐具有了以往任何艺术流派的音乐作品所没有的独特音响、色彩和风格、魅力；也才使得频谱音乐在这种内在的似乎难以解决的矛盾驱动下，不断发展、不断前行、不断创新。而且也正因为如此，我们就更有必要对这一艺术现象、这一近二三十年来最重要的音乐流派（姑妄称之，虽然他们自己不承认）作品与技法等进行比较广泛深入的研究分析。目的正如本文之前所述，兹不重复。

至此，肖武雄先生这项研究和这本著作出版的意义已然非常清楚了，无须赘述。

衷心祝愿肖武雄先生以这本著作的出版为新的起点，在音乐创作、理论研究和专业音乐教学领域继续努力，取得更大的成绩！

2011 年 3 月于上海音乐学院

绪 论

本书的目的是为了研究具有国际影响的法国频谱音乐流派在作曲技术领域探索的新成果。文本以第一代频谱音乐作曲家杰勒德·格瑞瑟、提斯坦·缪哈耶的作品为研究重点，辅助于第二代“后频谱”作曲家的作品为佐证，深入探讨他们作品中反映出来的声学原理；借助电子仪器、电脑频谱分析来揭示构成这些作品的声音本质；探求他们把声学、电子理论运用于常规管弦乐器的经验成果，最终总结出频谱音乐作品的组织结构特性。

本书结构为上、中、下三篇。其中上篇为“理论建模与运用”，分为《频谱基础》、《泛音的作用》、《音乐的结构力因素》、《频谱音乐的音高素材》、《频谱音乐的声音合成原理》五章内容；中篇为“结构形态与原则”，以作品总谱为线索来求证取实，且按照音乐“术科”分类标准归纳出频谱音乐旋律形态、和声建构、节奏参数、复调特征、曲式原则、配器原则六章内容。下篇为“原理运用与实践”，选取法国频谱音乐以外的六部作品为例，检验这一理论成果对于不同风格、不同国籍，尤其是对于中国作曲家的创作实践的指导意义，探索它对创作前的案头准备、创作后的音乐形态等领域运用的科学性、艺术性、适度性。同时附有十二个附录，涉及计算公式、实验数据、频谱语图、相关定律、谱例图形和作曲家作品索引信息，它们是本书论证的重要论据，其中出现了音乐家们较少涉及的数理、声学专业术语，它们同样是不可省略的科学推理依据。

本书所进行的讨论、研究工作面临着资料的匮乏、部分资料所存在的语言、文字上的障碍以及国内学术界在此领域中较为薄弱的研究状况等客观因素的限制，这些限制给研究的进行带来了一定的困难。鉴于此，本书的研究主要依据下述几个方面的材料进行：

一、经过英译的法文专著资料

二、英文专业期刊发表的专业论文

三、网上下载的 PDF 文件资料

四、相关中文论文、专著

五、专业出版社出版的总谱及网上下载的 PDF 乐谱文本

六、专业音响公司出版的音响及网络下载音响

本书研究的特征：以总谱研究为主线，声学解密、实验取证为手段，把现代声学、电子物理、电脑运用与音本体的技术理论相结合，交叉辅助，多线展开。同时也兼顾一点寓于谱面之后，具有更深层指导意义的音乐思想、观念的论述，提出了一些个人的观点，论证了频谱音乐组织结构的主要原则。

本书引用的参考书目、论文、总谱均已注明出处。

上篇因数理、声学、电子原理涉足较多，为了方便，增强音乐人士的阅读流畅性，所有诠释、引文都以尾注和附录的形式出现。

中篇以论证求实为主，按照音乐术科分类标准论述，同样为阅读方便，而把诠释、引文改用脚注形式出现。

下篇为原理运用与实践篇，以作者近七年持续研究以及学术讲座的成果为基础，论证频谱音乐基本原理所具有的更加广泛的科学性、艺术性、适度性。所有谱例、图形按照本书出现的先后次序及作曲家姓名、创作年代在附录中以索引的形式出现。

书中没有注释译文作者的所有译文，皆为笔者翻译。

频谱音乐的相关背景

20世纪70年代开始，五位法国年轻作曲家杰勒德·格瑞瑟（Gerard Grisey1946—1998）、提斯坦·缪哈耶（Tristan Murail，1947— ）、罗杰·泰西埃（Roger Tessier，1939— ）、迈克尔·勒维斯（Michael Levinas，1949— ）、于格斯·迪富特（Hugues Dufourt，1943— ）[①]共同发表宣言《l'tineraire》（道路、旅程之意），声明要通过作曲家、演奏者与音响工程师协力创造出新的声音世界，成立了名为 Ensemble l'tineraire 的室内乐团。在其创作早期并没有给他们的作品一个特别的称谓，但其创作方针、态度确已坚定，那就是反对当时风头尚劲的序列音乐。事实上，法国音乐一直在力求摆脱德国（主流）音乐的影响，走自己的路，从雅内坎（Janequin）到马肖（Machaut），到梅西安（Messaien），再到布列兹（Boulez），法国音乐家始终在探寻一条属于自己的、不受约束的康庄大道。“路线探索小组”沿着前辈的足迹继续奋进，他们认为：“序列音乐是一种绝对的过程，即使它是一种最初的结构力，那么这种结构力也是武断的”，“序列音乐相对于频谱音乐而言，它是一种更霸权、主观、武断的体系。频谱更加客观、更加现实一些，它首先是以揭示声音本源的特性作为出发点”。[②]由此可见，最好的创新观念就是“否定”，哪怕矫枉过正。只要有“置于死地而后生”的精神，加上“锲而不舍”的求索，总会迎来柳暗花明又一村。更何况他们确实把住了序列音乐的命门，深切地感悟到了“这种带有‘严格预制性’的作曲手法已经成为了一种桎梏，当它发展到极端之时，便物极必反，作为对这种极端理性化的反动，必须寻找另一种解放”[③]。他们怀着这样的目的，完全致力于研究声音本体的质地，根据泛音原理、频谱图等手段终于踏上了一条通向光明的全新历程，把现代艺术与当代科学联姻，取得了硕果累累、举世瞩目的成就。时至1979年，他们的代言人、被誉为哲学家的于格斯·迪富特在一篇文章中第一次使用“频谱音乐”（Spectral Music）来概括他们的音乐。至此，“频谱音乐”成为了时尚的关键词，逐渐向世界范围渗透。“路线探索小组”的作曲家理所当然地被冠以“频谱音乐作曲家”的头衔，这给他们带来了“无上荣誉”，同时也带来了“不尽的麻烦”。走到世界各地受到花团锦簇的拥戴，急转直下就是不断解释什么是频谱音乐，这件事本身可能也是音乐史上的一大奇

观，耐人寻味！下面我们来看格瑞瑟和缪哈耶是怎么解释的：

G. 格瑞瑟说：

频谱不是一种体系，不是象序列音乐，甚至调性音乐一样的体系，它是一种态度。它去考察声音，不是作为一个静止的物体，这样你很容易武断地得出其各个方面的结论，而是把它作为一个赋予生命的事物，有其生长和死亡的全过程。这不是一个新的观点，我认为瓦雷兹（Varese）已经是这种思想的先行者了，他是我们大家的始祖。第二点需要陈述的是频谱运动，尤其是在其开始的时候，是想在观念和知觉对象（对于乐谱的观念和听众的感知）之间找到更好的方法，这点对于我们是非常重要的。如何去实现这个目的呢？就是从声本体出发去重新思考，诸如：什么是八度、三度，什么是协和不协和等问题。音乐是种文化，但它又不同于一般的文化，对声音的感受首先是来自于生理方面，20—30年前，我是用频谱先去测试声音内部的属性而后再把它们转变成作曲的组织形式。我不是一个纯粹的频谱音乐作曲家（对频谱的依赖并不比别的作曲家多），但通过频谱我探索时间的延伸和连续性使我成名。作曲家如何去延伸时间呢？什么是时间延续的代码呢？这是频谱主义真正的起点。而没有去思考频谱是什么。[④]

T. 缪哈耶在论文《再思》（*After-thoughts*）中说：

“频谱音乐是由于我们曾经用频谱作为探索信息的科学工具，此后比较草率地使用了频谱音乐这个词。”[⑤]

“我不相信‘频谱体系’的说法，如果我们要去了解一种客观声音的属性，那么，它的频谱可以提供确定的谱系。我相信‘频谱’是一种态度的说法。”[⑥]

“频谱不是新的事物，它是频率内部的自在反应。通过旋律，和声，音色，节奏，甚至不为人们定义的名词来重塑自己。”[⑦]

“频谱仅仅是对一种声景的映射取样（它把声音现象可视地描述出来，译者加注）……因此，最重要的是：这些取样是作曲家行动的结果，而不是假设。”[⑧]

“人们总是把我们的音乐称为‘频谱音乐’，这既不是格瑞瑟，也不是我指定的名词，相反，它常常使我们感到不满足，欠合适。但是我仍然将继续使用它，把它作为追求效率的一种激励，时常鞭策我自

己，就像序列主义、印象主义、新古典主义等等一样，它们具有同等作用。”⑨

通过上面的引述可以看出“频谱音乐”这个名词自诞生之日起就具有“先天不足”，甚至于在“路线探索小组”内部也没有完全认同，但是又苦于找不到更好、更精练的词语来替代，故而就默许了这个称谓。正如缪哈耶说的把它作为一种激励，时常鞭策我自己，去完善它，使其终能成为一种“实在的主义和流派”，就像序列主义、印象主义、新古典主义等一样，它们具有同等作用。

事实上，频谱早就在物理声学、光谱、地震探测等领域广泛运用。由于计算机电子音乐技术的发展，这种频谱分析的手段被借用到更广泛的领域（比如视频、声频和信号传输领域），进而迅速普及，尤其是20世纪80年代以后得到巨大的发展。现在甚至于忘记了它的早期意义，以为它是计算机科学的专用术语，这确实是种误解。频谱是通过时频、域频的转化运算，以语图的形式反映研究对象的微观与宏观特征的信号图。

频谱是什么已经不重要了，重要的是在当今推崇创新的个性解放时代，还能出现诸如“频谱音乐”这种为世界广泛认同的“音乐流派”，其中的奥妙和秘密值得研究和学习。

注释：

① 五位中除了于格斯·迪富特以外，其余四位都是梅西安的学生，迪富特在他们“路线探索小组”中被誉为“代言人”和“哲学家”。

② Tristan Murail：Target Practice，Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 152.

③ 郑英烈：《序列音乐写作基础》，上海音乐出版社1999年版，第160页。

④ Š 20th-Century Music，1996 Contact David Bündler Last revised：December 16，2001.

⑤ *Contemporary Music Review* 2000，Vol. 19，Part 3，pp. 5—9.

⑥⑦⑧⑨ Tristan Murail：Target Practice，Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，pp. 149—171.

目 录

上篇 理论建模与运用

第一章 频谱基础 …… 3
1.1 频谱概念 …… 3
1.2 频谱语图的信号内容 …… 5
1.3 协和结构 …… 8
1.4 时间过渡性 …… 11
第二章 泛音的作用 …… 19
2.1 泛音与谐波系列 …… 19
2.2 整数倍音列 …… 22
2.3 实验泛音 …… 30
2.4 共振峰泛音与质数泛音 …… 33
2.5 微分音的出现条件 …… 34
第三章 音乐的结构力因素 …… 37
3.1 X 轴的参数 …… 37
3.2 Y 轴的参数 …… 38
3.3 Z 轴的参数 …… 39
第四章 频谱音乐的音高素材 …… 48
4.1 正弦波、锯齿波音高数列 …… 49
4.2 方波、三角波音高数列 …… 49

4.3 脉冲波音高数列 …… 49
4.4 共振峰音高数列 …… 50
4.5 人工可变音高数列 …… 50
4.6 噪音 …… 52
第五章 频谱音乐的声音合成原理 …… 56
5.1 原形合成 …… 57
5.2 变形合成 …… 61
小结 …… 70

中篇 结构形态与原则

第六章 频谱音乐的旋律形态 …… 75
6.1 射线型旋律 …… 75
6.2 直线型旋律 …… 76
6.3 拍音型旋律 …… 77
6.4 锯齿型旋律 …… 79
6.5 阶梯型旋律 …… 81
6.6 带状旋律 …… 84
6.7 合纵旋律 …… 86
第七章 频谱音乐的和弦建构 …… 89
7.1 倍频和弦 …… 89
7.2 旁频和弦 …… 92
7.3 间谐波和弦 …… 94
7.4 和弦连接的逻辑依据 …… 96
第八章 频谱音乐的复调特征 …… 101
8.1 由回声构成的模仿复调 …… 101
8.2 由共鸣构成的支声复调 …… 104
8.3 由循环构成的复调 …… 105
8.4 音色复调 …… 112
8.5 化横为纵的复调 …… 113
8.6 速率复调 …… 114

8.7 多维复调 …… 119
8.8 环绕构成的复调 …… 123
第九章 频谱音乐的曲式原则 …… 129
9.1 时间过渡性 …… 132
9.2 自我繁殖与自我破坏（阻断）原则 …… 136
9.3 可预测与不可预测原则 …… 138
9.4 协和序进原则 …… 141
第十章 节奏参数 …… 145
第十一章 频谱音乐的配器原则 …… 148
11.1 ADSR 原则 …… 149
11.2 协和序进原则 …… 161
11.3 模糊原则 …… 172

下篇 原理运用与实践

第十二章 对利盖蒂为弦乐队而作《分歧》的频谱分析 …… 191
第十三章 基于徐孟东管弦作品《远籁》的频谱分析 …… 202
第十四章 肖武雄第二交响乐《台风》的案头设计 …… 210
第十五章 混乱中的秩序，秩序中的无序
——论陈晓勇音乐作品体现的组织原则 …… 228
第十六章 由杨立青三部胡琴与乐队作品看其管弦化语言的变迁 …… 251
第十七章 一个音引起的革命 …… 269
结 论 …… 286

主要参考资料 …… 289

附录一 声音合成技术 …… 294
附录二 相关计算公式 …… 305
附录三 实验数据 …… 306
附录四 交响乐器频谱图 …… 307
附录五 乐器的重要频率范围表 …… 338

附录六　十二平均律各律音的频率 …… 340
附录七　谱例图形索引 …… 342
附录八　引用作曲家作品索引 …… 359
附录九　现代声学的研究成果 …… 363
附录十　八度“极限”划分 …… 365
附录十一　声学相关定律 …… 366
附录十二　声学学科范畴 …… 367

后记Ⅰ …… 369
后记Ⅱ …… 371
后记Ⅲ …… 375

上篇　理论建模与运用

本篇前三章内容主要研究声音的自然属性，不包括众所周知、人们感官就能掌握的已有知识，而把研究重点渗入微观、极限领域，所以需要借助当代科技的发展成果，尤其要借用现代电子声学的实验工具来实证性地揭示声本体的自然属性，进而为科学、艺术地开发利用它们提供依据；后两章论述利用人为手段去提取和改变声音的自然属性，使其为我所用，雕琢变形，还原和创新合成人们已知和未知的声音。

第一章 频谱基础

本章主要介绍频谱的概念及频谱图所包含的内容参数，这是研究频谱音乐所必须要了解的基本常识，是频谱音乐组织结构的根本动因，后面的各章内容都是从不同的角度对本章的基本概念展开论述，这就好比是作曲的“主题动机”已经呈现，其重要意义事关全局。

1.1 频谱概念

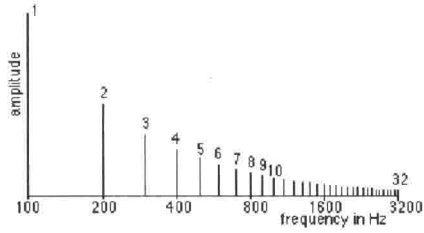
“频谱”（Spectrum）这个术语来自于光学。“频”是“频率”的简称，“谱”是“谱系”的意思，谱系分二维和三维两种函数[①]关系。

其中二维指由频率（Frequency）[②]、振幅（Amplitude）[③]、时间（Time）两两参数构成的函数关系。

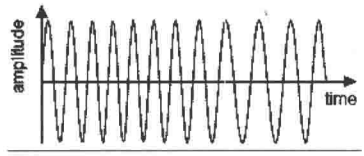
三维指由频率（Frequency）、振幅（Amplitude）、时间（Time）共同构成的函数关系。

通过对频谱的分析，可以了解周期函数（纯音）和非周期函数（复合音和噪音）的一些基本性质，了解各次谐波的振幅随频率的变化情况。我们已经知道，一个非正弦周期函数可以展开成傅立叶[④]级数，将傅立叶级数中每一个正弦分量的振幅和初相角[⑤]沿着频率轴（或者振幅沿着时间轴；频率沿着时间轴；频率、振幅沿着时间轴），分别画出来而成的图形即称为“频谱图”[⑥]，简称“频谱”。（见例 1A－E）

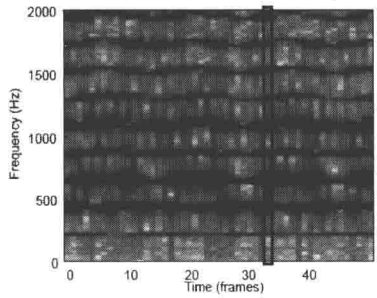
例 1A：频率与振幅的频谱图



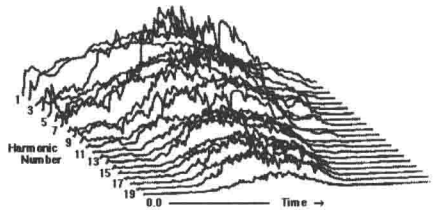
例 1B：时间与振幅的频谱图

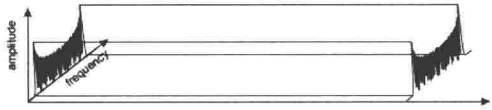


例 1C：时间与频率的频谱图



例 1D—E：时间、频率、振幅的三维频谱图





离散谱：例 1A 上一根根竖立的直线代表许多正弦波，它们站在自己的频率位置上，它们耸立的高度表示它的振幅或能量。它们组成齿尖极不整齐的梳子状。那种竖直线构成的梳子状就叫“离散谱”。

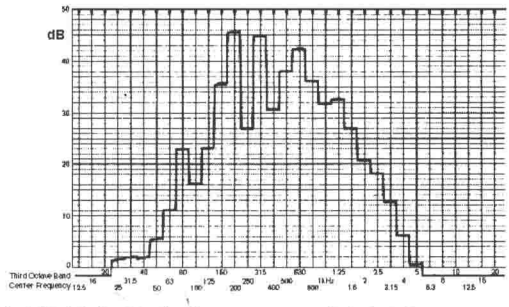
包络线：把离散谱上竖直线顶端连接起来组成的线叫“包络线”。

共振峰：一段包络线构成的连续谱上的鼓峰被称为“共振峰”。那些鼓峰表明，相应频段的能量比较强。那种能量的频率分布方式决定了音质。

1.2 频谱语图的信号内容

频谱图上的竖直线分别代表许多正弦成分波，每一根竖直线叫做一个谐波。例 1A 记录了 1—32 号谐波的频率与振幅关系，其中 1 号谐波是基音，它的频率是 100Hz，2 号是它的第一个泛音频率为 200Hz……32 号谐波是它的 31 号泛音频率是 3200Hz。可见表中记录的全是基音的整数倍泛音，这是泛音的基本存在形式（事实上还有大量非整数、非线性的谐波存在，在这里不表述，后面详述）。同时可以看到 1—32 号谐波的振幅能量越来越小，即振幅与谐波序数、频率成反比函数关系，高频音，声能弱；低频音，声能强。其声波[7]离散谱表明声波的振动是阻尼振动[8]。例 1B 表示的是振动系统因受外力影响，所受外力对系统所做的功恰好补偿系统因阻尼而耗散的能量时，使系统的机械能保持不变，系统的振动也就稳定下来，振幅保持不变，而成为等幅振动[9]。例 1 各图振幅轴都没有标明单位，一般情况应该用米（m）或分米（dm）、毫米（mm）为单位。

例 2：频率振幅二维频谱图



上图振幅轴用的单位是分贝（dB），而未用米（m）毫米（mm）为单位，这是因为振幅是与声能成正比例关系，振幅大，声音的能量就大，从而声音的强度（简称“声强”[10]）就大。可是声波振幅的真正位移是一个人们肉眼看不见，也摸不着的矢量[11]，而声音的强度却是人们可以感觉到的一个物理量，所以在频谱图中常常把振幅轴的单位换成声强级[12]来表示。这个轴严格地说起来是声强轴（或者叫分贝轴），就像分米（dm）跟米（m）的关系一样，分贝（dB）是贝尔（Bel）的分一级单位，d 是表示十分之一的符号。分贝是分级单位，所以 1Bel 就是 10dB，15Bel 就是 150dB。

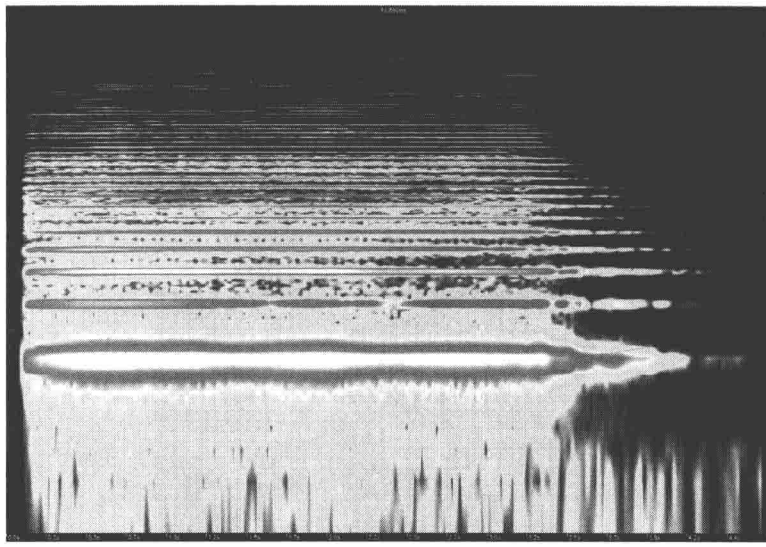
在例 2 离散谱中可以看到最大共振峰是在 47 dB，200 Hz 处。

例 1C 记录的是大提琴在小字组降 b 上演奏的颤音放大频谱图（频谱全图请参看附录四《交响乐器频谱图》图 18F），图中最下面一根黑色直线为基音小字组降 b，上方的多条波浪形的曲线是基音的泛音，由于有颤音效果，所以泛音谐波成波浪形。这些谐波等距离排列，都与基音成整数倍关系，它们称为“倍频”（在彩色频谱图中为暖色调）。倍频间的灰色不连续条纹是非整数倍谐波，称为“旁频”（在彩色频谱图中为冷色调）。

例 1D—E 是三维频谱图，D 记录了长号在大字组 E 音前二十号谐波的振幅包络分布，例 1E 为三维骨架。

下面以大提琴小字组降 b 拉奏，不揉弦为例来研究彩色频谱（以 Sequoia 软件取样及 Sound forge 频谱逻辑分析为依据）。

例 3A：大提琴小字组降 b 拉奏频谱图

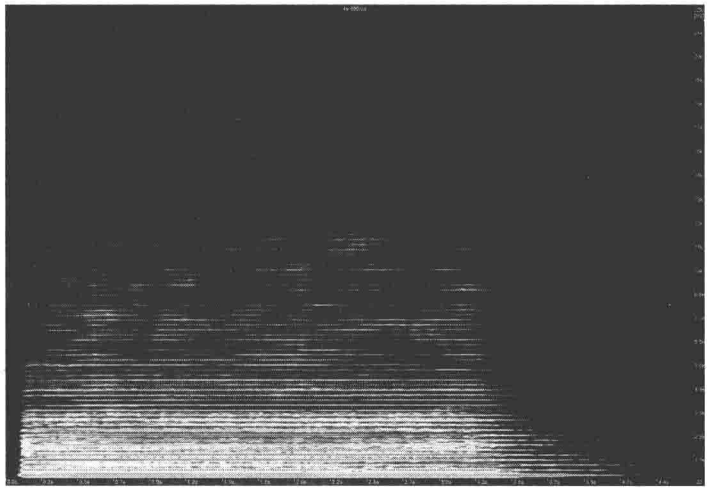


由例 3A 可见，图中最粗的直线亮光就是基音，通过例 3C Sound forge 频谱逻辑分析，我们得知它的频率为 237Hz，其下的不规则图形为噪音和沉音，上方的亮光直线为泛音（整数倍谐波），越往上（越向高频发展）的谐波越暗淡（频率由低到高，谐波由暖色向冷色发展）。而且越来越模糊，由直线变成断断续续的线，再变成点。频谱的这个特点称为“收敛性”。[13]

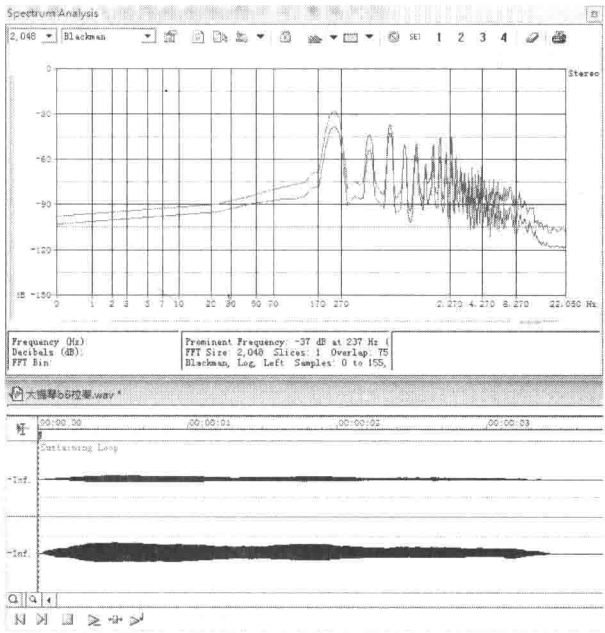
例 1C 的倍频谐波都是均匀等距离分布，为什么例 3A 的倍频谐波却是粗细不等，间距逐渐缩小的分布？这是因为频率轴上的刻度是非均匀的函数分布所致。因为频率轴的取值是从 0—22,000Hz 范围很大，为了看清基频及其简单整数倍上的谐频分布，因而采用函数刻度分布。

下面例 3B 的频率纵轴采用的是近似的等距离刻度分布，第一个刻度为 1.7Hz、第二个刻度为 3.4Hz、第三刻度为 5.11Hz、第四刻度为 6.8Hz、第五刻度为 8.5Hz、第六刻度为 10Hz……同样的采样音源，大提琴小字组降 b 拉奏的频谱显示，基音与谐波泛音的分布就是等距离了。频谱的这个特点称为“谐波性”。[14]

例 3B：大提琴小字组降 b 拉奏 · 全域频谱图



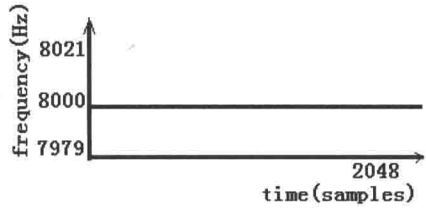
例 3C：大提琴小字组降 b 拉奏 · Sound forge 频谱逻辑分析图



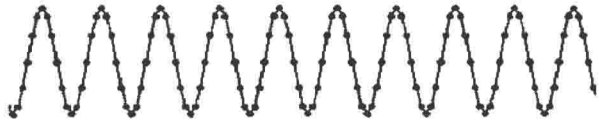
上图 Sound forge 频谱逻辑分析中有两个重要数据：一个是 FFT

Size2,048，它表示在一秒钟内时域转频域的傅立叶转化次数，简单理解就是每秒钟进行了 2,048 帧[15]的傅立叶转换；第二个是 Samples：2,048，它表示采样率[16]是 2,048。参见下面例 4，横坐标时间轴用的单位就是采样率，因为在描述声波的传导过程时，秒及毫秒这种时间单位都还太大、太粗，不足以更真实、尽可能无损地记录声波的实际传导情况，为了最大地接近真实，把一秒钟再细分为 256、512、1,024、2,048、4,096……对信号进行取样分析，相对应的数字称为采样率。采样根据不同的目的可以做不同的分配标准，比如上面是对时间轴的细分采样，也可以以声音的频率为对象进行采样，如声波频率的采样一般分为 22.05KHz、44.1KHz、48KHz 三个等级。22.05 KHz 只能达到调频（FM）广播的声音品质，44.1KHz 则是理论上的 CD 音质界限，48KHz 则已达到 DVD 音质了。以 44.1KHz 为例，表示在 1 秒钟的时间内记录了 44,100 个数据来描述的声音波形。原则上采样率越高，声音的质量越好。

例 4：频率时间采样二维图



例 5：正弦波形采样演示图



此图是以正弦波形做了个例子。实际上就是每隔一定的时间取样一次，每次取样之间的频率，就是我们常说的“采样率”。

1.3 协和结构

协和与不协和问题是音乐的基本问题，直到今日还没有一个完全的、绝对的标准，因为它是一种相对的认识论，不可能存在终极认识。对协和的认识不仅仅是一个物理问题，还是一个心理认知问题。从心理认知层面去解释协和是比较复杂的，不同的时代、不同的流派有不同的观念。从物理的角度来研究协和问题要相对客观一些，也容易一些。尤其是有了现代

科技手段，有了频谱的取样分析，它可以让我们实证性地看到实验的结果。在这里，我们从单一基音及其产生的谐波系列反映的频谱特征来研究协和问题，也就是说，先弄清楚什么样的频谱是协和的？什么样的频谱是不协和的？进而推理出不同音高的结合问题，哪些能构成协和结构，哪些构成不协和结构。

就一般情况而言，协和频谱需要满足下列条件：

（一）协和频谱的一般条件：

1. 必须是基音的简单整数倍谐波。

2. 由同波形组成的频谱。

3. 它的表现是线性化频谱。满足 $p=f\cdot r$（p 为泛音频率 partial、f 为基音频率 frequency、r 泛音序数 rank）。参见例 6A 图。

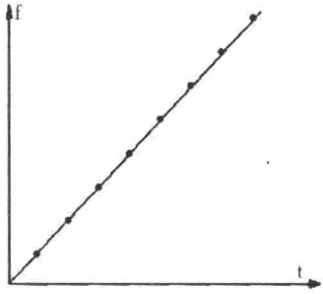
（二）不协和频谱的条件：

1. 由谐波失真构成的频谱[17]。

2. 由繁殖调制构成的衍生频谱。

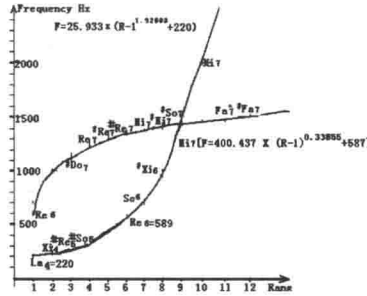
3. 非线性频谱，满足 $p=f\cdot r^d$（d 为失真量 the power of distortion），且 $d<1$ 或 $d>1$ 时是不协和频谱。

例 6：协和与不协和频谱函数图



协和频谱函数图 d=1

A. **协和频谱线性显示**



不协和频谱函数图 d<1 **或**

B. d>1 **不协和频谱非线性显示**

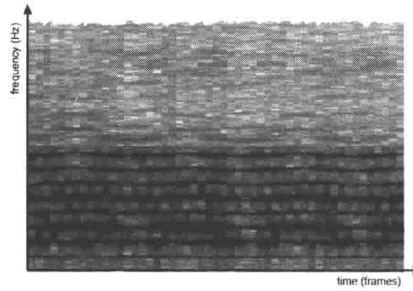
协和及不协和频谱图呈现下列特征，以大提琴小字组降 b 拉奏为例，参看例 7A。

从图中很容易看到基音及它的前八号谐波（前七个泛音）的谱线为连续谱线，这种基音整数倍上连贯的谱线构成的就是协和结构[18]。

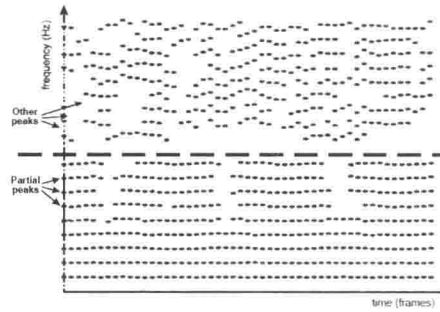
第九号谐波及以后的整数倍泛音都是不连续的散线或点，这些就是不协和结构，参见例 7B。

图中紧紧贴着倍频谱线的暗影是旁频，其间的灰点是间谐波。

例 7A：大提琴降 b 拉奏 · 频谱放大图



例 7B：大提琴小字组降 b 拉奏 · 频谱放大图（点粒子显示）



粒子线为协和倍频，粒子不连续线为不协和倍频，灰色暗点为旁频与间谐波。

上述的划分主要是让我们对于协和结构有一种“视在的”更“清晰化的”认识，这种认识是建立在“科学性”、“实证性”的基础之上，这对于我们进一步认识声音的本质具有重要意义。同时我们也要看到大千世界声音的现实情况要远远比上述的几个图形复杂得多，更多的时候很难用量化的方法来具体区分倍频、旁频、间谐波，它们自身之间就具有辩证关系，而且还与周围的外部环境具有千丝万缕的联系。所以上述的图形事实上是一种理想化环境之中的理论数据，尽管如此，这还是对于我们的认识具有不可估量的重要进步意义。

综上所述，我们可以把协和结构总结为下面几个等级：

协和结构：由简单倍频构成。

不协和结构：由复杂倍频构成。

二级不协和结构：由旁频构成。

三级不协和结构：由间谐波构成。

协和结构的递进等级划分对于现代音乐推崇的“模糊理论”具有重要意义。“模糊原则”作用于音乐就是充分地运用前景、中景、背景（即倍

频、旁频、间谐波）的色彩属性去化合、混合、间离、溶解、分解、综合、清晰、模糊音响组织的原则。模糊原则，倍频作为前景，旁频作为中景，间谐波作为背景。当然也可以反过来，把倍频作为背景，倍频受干涉形成的旁频作为中景，倍频的自我繁殖及干涉、调制而成的间谐波作为前景。不管怎么看，声音音色的层次划分已经是存在的事实。这对于我们的音乐创作具有十分重要的作用。

必须进一步说明的是，协和、不协和频谱与协和、不协和结构不是一回事。频谱分析的对象通常情况下是微观、单一的声音。比如上面列举的大提琴小字组降 b 这一个音，按照传统乐理的理解这一个音是完全协和的，但用频谱来分析却不是这样看，因为这个音是复合音，它不是纯音，为什么我们知道它是大提琴发出的音响，而不是钢琴的音响呢？原因就是它们的频谱不同，每一种乐器的每一个音的频谱都具有唯一性，甚至于同样的乐器，同样音高的音，它们的频谱也具有可以鉴别的差异性（比如两把大提琴用同样的发音方法演奏小字组降 b，它们的频谱也只是具有相似性，而不会完全一样，频谱分辨率越高，这种差异性越明显。这就好比人的指纹具有唯一性、排他性，即使是双胞胎也是如此）。这正是频谱分析的独特而不可替代的意义。通过一个音的分析，深化揭秘它的谐波系列的全部秘密，事实上，等同于揭开了一个微观的太阳系，把构成这个独特音色的复合音分解成线性、非线性纯音，并按照倍频、旁频、间谐波的自然属性和自身独特的逻辑规律组织起来，频谱就像一个高倍显微镜扩大呈现了这肉眼看不见的微观世界，这其中就有线性协和频谱区域，非线性不协和频谱区域之区别，一旦掌握了它们的组合规律，就可以用人为的手法来合成人们想要的音响，这个过程是一个微观作用于宏观的过程。

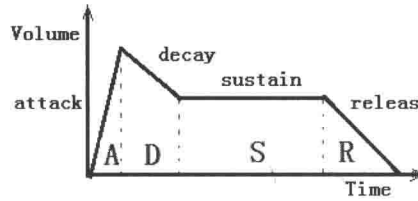
如果把协和、不协和频谱反映的规律提取出来作为第一集合音高素材，且用它来生成纵横组织的和弦结构的话，这种结构就称为协和、不协和结构。可见协和、不协和结构已经变为应用领域的宏观问题了，对于它的深入讨论我们留待下篇进行。

1.4 时间过渡性

声音的时间过渡性是指声音自发声开始至结束声音全过程的发展轨迹。也就是说，把声音看作具有生命力的客观存在，它有生长、死亡的全过程。在傅立叶分析的基础上，丹尼斯·加伯[19]发现声音具有时间模式和频率模式，因而在分析声音时，首先要包括声音的时间、频率二重性。由

此理论为基础，实证性地证明声音具有时间过渡性。与时间过渡性联系最紧密的就是声音的 ADSR 包络参数，它在音乐作品中是以声音状态的结构属性表现出来。下面就是一个声音采样的 ADSR 包络分析图。

例 8：ADSR 包络图



这是声音音量随时间变化的 ADSR 包络图。

起音（attack）、衰减（decay）、保持（sustain）、释音（release），分别取四段名称的第一个字母，四段包络又叫做“ADSR 包络”。

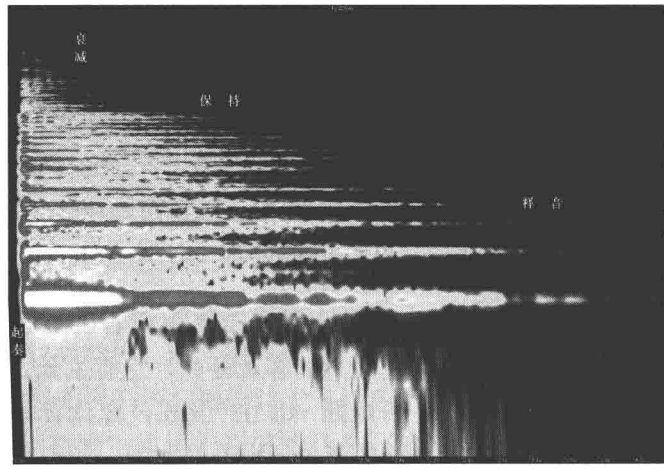
起音：这段决定声音从开始发出到最初的最大音量所需的时间长短。在打击乐及弦乐拨奏木管断奏音色里这部分时间非常短。参见附录四的图 16B—C，小提琴 c^1 拨奏频谱图。

衰减：在声音达到最大音量后立即发生衰减的时间长短，衰减后的音量大小就是后面保持的音量大小。参见附录四图 16B—C 小提琴 c^1 拨奏频谱图。

保持：它决定在衰减后音量保持的大小，与其他三个不同的是它并不代表保持的时间长短。通常保持的音量都低于起音的最高音量，不过也有相同甚至高出起音音量的。参见附录四图 16A，小提琴 c^1 拨奏频谱图。

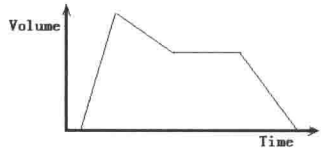
释音：这是声音最后的阶段，代表着声音从保持的音量逐渐衰减到无声的时间长短。参见下图例 9。

例 9：小提琴自由跳弓 c^1 频谱图

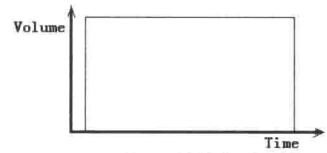


注意，并不是所有的声音都有这四段包络，比如敲击木鱼只有起音和释音两段，管风琴没有衰减阶段，甚至有些合成器只有 AD 这两段包络发生器。参见下图例 10。

例 10：长号、管风琴、雷击声包络图



长号的包络



管风琴的包络

雷击声的包络

另外，ADSR 包络不仅可以做声音的音量控制，而且还广泛运用于声音的音高、音色的参数控制，是声音滤波合成的基础。在频谱音乐中，它主要起乐曲的结构作用。

以上用声音生态学的态度研究了声本体以频谱语图的方式反映的自然属性，下一章将就单一基音（同声场）产生的谐波系列中的微观世界展开讨论，以极限认识论的方法研究泛音的作用。

注释：

① 在数学领域，函数是一种关系，这种关系使一个集合里的每一个元素对应到另一个集合里的唯一元素。简单地说，甲随着乙变，甲就是乙的函数。根据它们关系的不同复杂程度函数被分为：

一次函数（一般用 y=f（x）表示）、二次函数、三角函数、幂函数、多元函数、复合函数、反函数、隐函数、高斯函数，等等。

② 在 1 秒钟内，物体完成全振动的次数叫“频率”。通常用符号 f 表示频率。在国际单位制中，频率的单位是赫兹（Hz），简称赫。像周期一样，频率既可以表示作振动或其他周期性运动的物体每秒钟完成周期性运动的次数，又可以表示某些物理量每秒钟完成周期性变化的次数。频率等于周期 T 的倒数，即 $f=\frac{1}{T}$。

③ 振幅是用来表示振动强弱的物理量，振动物体离开平衡位置的最大距离，叫做振动的“振幅”，通常用符号 A 表示。简谐振动的振幅是不变的。强迫振动的稳定阶段振幅也是一个常数。阻尼振动的振幅逐渐减小，振幅是可变化的。振幅的单位跟长度的

一样是米（m）或毫米（mm）。

④ Jean Baptiste Joseph Fourier，1768—1830，法国数学家及物理学家。最早使用定积分符号，改进了代数方程符号法则的证法和实根个数的判别法。主要贡献是在研究热的传播时创立了一套数学理论，推导出著名的热传导方程，并在求解该方程时发现解函数可以由三角函数构成的级数形式表示，从而提出任一函数都可以展成三角函数的无穷级数。傅立叶级数（即三角级数）、傅立叶分析等理论均由此创始。

傅立叶级数的三角函数形式，设 f（t）为一非正弦周期函数，其周期为 T，频率和角频率分别为 f 和 ω_1，由于工程实际中的非正弦周期函数，一般都满足狄里赫利条件，所以可将它展开成傅立叶级数。即

$$f(t)=\frac{A_0}{2}+A_1\cos(\omega_1 t+\psi_1)+A_2\cos(2\omega_2 t+\psi_2)+$$
$$A_3\cos(2\omega_3 t+\psi_3)+\cdots+A_n\cos(n\omega_n t+\psi_n)+\cdots$$
$$=\frac{A_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}\cos(n\omega_1 t+\psi_n)\qquad (n=1,2,3)\qquad 式(1)$$

其中 $A_0/2$ 称为“直流分量”或“恒定分量”；其余所有的项是具有不同振幅、不同初相角而频率成整数倍关系的一些正弦量。$A_1\cos(\omega_1 t+\psi_1)$ 项称为“一次谐波”或“基波”，A_1、ψ_1 分别为其振幅和初相角；$A_2\cos(\omega_2 t+\psi_2)$ 项的角频率为基波角频率 ω_1 的 2 倍，称为“二次谐波”，A_2、ψ_2 分别为其振幅和初相角；其余的项分别称为“三次谐波”、“四次谐波”等。基波、三次谐波、五次谐波……统称为“奇次谐波”；二次谐波、四次谐波……统称为“偶次谐波”；除恒定分量和基波外，其余各项统称为“高次谐波”。式（1）说明一个非正弦周期函数可以表示一个直流分量与一系列不同频率的正弦量的叠加。

上式可改写为如下形式，即

$$f(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}A_n\left[\cos\psi_n\cos n\omega_1 t-\sin\psi_n\sin n\omega_1 t\right]$$
$$=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}a_n\cos n\omega_1 t+\sum_{n=1}^{\infty}b_n\sin n\omega_1 t\qquad 式(2)$$

其中

$$a_0=A_0$$
$$a_n=A_n\cos\psi_n$$
$$b_n=-A_n\sin\psi_n$$

a_0、a_n、b_n 的求法如下：

$$a_0=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}f(t)\,dt$$
$$a_n=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}f(t)\cos n\omega_1 t\,dt\qquad 式(3a)$$
$$b_n=\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}}f(t)\sin n\omega_1 t\,dt\qquad 式(ab)$$

故进而可求得：　$A_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2}$　式（3c）

$$\psi_n = \text{arctg}\frac{-b_n}{a_n} = -\text{arctg}\frac{b_n}{a_n} \qquad \text{式（3d）}$$

当 A_0、A_n、ψ_n 求得后，代入式（1），即求得了非正弦周期函数 f（t）的傅立叶级数展开式。

把非正弦周期函数 f（t）展开成傅立叶级数也称为“谐波分析”。工程实际中所遇到的非正弦周期函数有十余种，它们的傅立叶级数展开式前人都已作出总结，可从各种数学书籍中直接查用。

从式（3）中看出，将 n 换成（－n）后即可证明有

$$a_{-n} = a_n$$

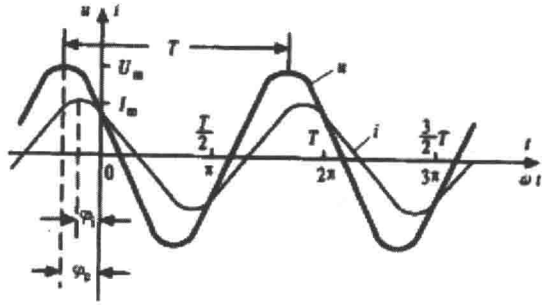
$$b_{-n} = -b_n$$

$$A_{-n} = A_n$$

$$\psi_{-n} = -\psi_n$$

即 a_n 和 A_n 是离散变量 n 的偶函数，b_n 和 ψ_n 是 n 的奇函数。

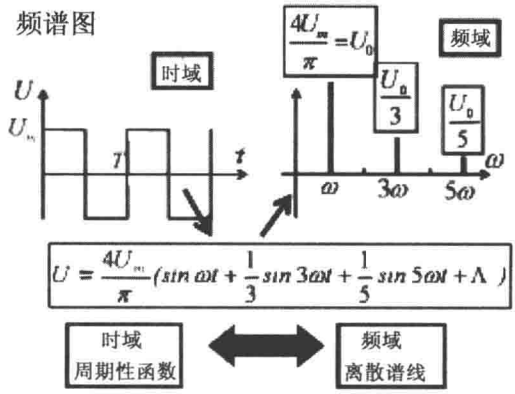
⑤ 决定正弦量起始位置，它是正弦量 t＝0 时刻的相角，用 φ 表示，简称“初相”，即



图中 T 表示周期；ω 表示角频率——每秒正弦量转过的弧度；Im 表示振幅，它们的关系是：

$$i(t) = I_m\cos(\omega t + \varphi)$$

⑥ 数学表达：



⑦ 弹性媒质中，各质点振动的传播过程称为“声波”。它是一种机械波。起源于

发声体的振动频率在 20～20000 赫兹之间的声波能引起人的听觉，故又称“可听声波”，频率在 10^{-4}～20 赫兹的机械波称为“次声波”，频率在 2×10^{4}～2×10^{8} 赫兹的机械波称为“超声波”。次声波和超声波一般不能引起人的听觉。从物理的观点来看，频率在 20～20000 赫兹的声振动与这个频率外的声振动没有本质上的不同。因此广义的声波包含次声波与超声波在内。是否能引起人的听觉，不完全由机械波的频率决定，还与声强有关。声波在固体中以纵波和横波两种形式传播，但在液体和气体中，则只能以纵波的形式传播。

⑧ 受到阻力的影响，振动的机械能不断地转化为其他形式的能。由于振动的能量与振幅的平方成正比，因此振幅将逐渐地减小，这种振幅随时间而减小的振动称为“阻尼振动”。

⑨ 振幅保持不变的振动称作“等幅振动”。物质系统做受迫振动达到稳定状态。

⑩ 声强是声波传播的能流密度，即在单位时间内通过垂直于传播方向上单位面积的声音能量。由于声音的强弱与声源的振幅有关。若声源的振幅大，单位时间内传出去的能量就大，因而声波也就较强。声源在某点发出的声波，向外传播，在距波源 r 处的声强为

$$I=\frac{E}{4\pi r^2}$$

其中 E 是声源每秒钟发出的能量，声强 I 的单位是瓦/米^2。声强与声音传播的距离有关，跟响度有关，但响度随声强的增加并不呈线性关系，两者是有区别的。声强是客观存在事实，它是声音强弱的物理量，不受人耳功能的影响。但响度却与人的感觉有关，当声波引起耳膜振动时又因人而异，对同一声强的声波反映不同，耳感灵敏者觉得响度大，而耳感差的就觉得响度小。对不同频率的声波，耳感亦不相同。凡能引起正常听觉的声波，对声强有一定范围的要求，对于每个给定的频率，要引起听觉，其声强也有两个极值。若根据正常听觉的实验结果，以频率为横坐标，以声强为纵坐标，将各种频率的声强上下限坐标连起来，低于下限的声强，不能引起听觉。凡超过上限的声强，使人耳有痛感。故上限曲线叫痛觉阈，下限曲线叫可闻阈，两曲线间的区域即为听觉范围。因此凡能引起人的听觉的声波，除对频率要求在 20～20000 赫兹外，还要求声强范围在 10^{-12}～1 瓦/米^2。由此可见声强变化范围是很大的。

⑪ 矢量指既有大小又有方向的物理量。比如力、速度；只具有大小，没有方向的物理量称为“标量”。比如体积、质量。

⑫ 声强级是声强的量度。声强 I 与标准声强 I_0 之比的对数称作声强 I 的“声强级”，用 L 表示，即

$$L=\lg\frac{I}{I_0}$$

单位为贝尔，用 Bel 表示，这个单位在实用上太大，故常用贝尔的 1/10，即分贝（用 dB 表示）作为单位，所以声强级的表示式为

$$L=10\lg\frac{I}{I_0}\ (\mathrm{dB})$$

I_0 为声强的参考标准，国际上选定 $I_0=10^{-12}W/m^2$，即可闻阈的声强值。

这样，最轻音 $10^{-12}W/m^2$ 的声强级就是 $10Lg_{10}\frac{10-12}{10-12}=0$，用 dB 为单位，最轻声就是 0。通常在谈话时的声强级为 60～70dB。

这里说的贝尔实际上是指能量的数量级。例如假设 10w（瓦特）是 1Bel，那么 100w、1000w、10000w 就是 2Bel、3Bel、4Bel。同样，1w、0.1w、0.01w、0.001w 就是 0Bel、－1Bel、－2Bel、－3Bel。使用对数很容易从瓦特的倍数关系来换算贝尔数。贝尔和分贝的换算式：

能量级＝log（E÷E0）　（Bel）

声强级＝10log（I÷I0）　（dB）

声功率级＝10log（W÷W0）　（dB）

声压级＝20log（P÷P0）　（dB）

其中用 0 标注的是参考值。当把参考值 P0 定为 0.00002 Pa（帕）时得到的是绝对声压级。相应地声功率级参考值 W0 为 10～12 w（瓦），声强级参考值 I0 为 10～12 w/m2（瓦/米 2）。

0.00002 Pa 是人耳刚刚可以听见的 1000 Hz 纯音的最小声压。人耳可以忍受的最大声压是它的 1,000,000 倍。相应地最小和最大的声功率值有 1012 倍的关系。用分贝表示的那种关系都是 0 ～ 120 dB 的关系。

用分贝数表示声强比较方便，也接近人对声强变化的感受。收音机音量旋钮转动角度的大小大致跟分贝值成正比，因此我们不妨可以去试一试，去感受它一下。假设旋钮顺时针方向拧动 10°是 10dB 的增益、10 倍功率，那么 20°是 20dB 的增益、100 倍功率，30°是 30dB 的增益、1000 倍功率；因为有每 10°是 10dB 增益的假设，因此旋钮转到 90°左右的时候，是 90dB 的增益、1,000,000,000 倍功率，音响已经很响了，从最小到最大 120°是它的极限，120dB 的增益意味着耳鼓承受到一万亿倍的功率变化或一百万倍的声压变化。（每 20dB 的增益声压增大 10 倍。）无论是大功率的音响设备还是小巧的随身听，音量过大都会造成听力损失。因为音响系统或仪器的功率范围都是有限的，任何环节音量调节失当都可能使信号发生畸变、失真。

另外，跟电学知识一样，声功率与声压的平方成正比，因此在表示声压级的对数算式里系数不是 10，而是 20。对于语音学研究来说，声强级和声压级的等公式计算得到的分贝值是一致的，没有实质上的差别。此外，3dB 和－3dB 是很常见的量值：3dB 表示功率增加到原来的两倍；－3dB 表示功率减少到原来的一半。

语音学中常用相对的分贝值。例如声音甲定为参考值，以它为准取 0dB，声音乙是甲声强的 100 倍就用 20dB 来表示，声音丙是甲声强的 1/10000 就用－40dB 来表示。注意：这时候我们没有用专门的精确仪器具体测量它们的声压到底是多少 Pa 或者声功率到底是多少 w，只是去精确计算相对的倍数关系。计算倍数关系容易多了，它可以用信号的电压变化来换算（参见声压级公式）。

注意：声音丁为 30dB 时，它与声音乙 20dB 的关系只能用分贝差数来说明，丁比

乙大 30dB－20dB＝10dB（10 倍功率）。有人竟然用 30dB÷20dB＝1.5 的关系来计算，那是错误的表述方法。说乙比甲0dB 大 20dB（100 倍功率），说乙比丙－40dB 大 60dB（1,000,000 倍功率）都是正确的，而＊20dB÷0dB、＊20dB÷（－40dB）很明显都是毫无意义的。问题在 Bel、dB 不是物理量单位，而是一种表示数量级的特殊符号，它们的差数跟功率的倍数有简单的数学换算关系。

⑬ 也称“衰减性”，即随着谐波次数的增高，各次谐波的振幅总趋势是减小的。

⑭ 即谱线在频率轴（$\omega=n\omega_1$ 轴）上的位置刻度一定是 ω_1 的整数倍，且任意两根谱线之间的间隔 $\Delta\omega=\omega_1$。

⑮ 频谱图是短时间声音信号分析的结果。所谓一帧分析范围，常取……64、128、512、1024……2 的整指数倍的时间点。帧长数值越大频率分辨率越高，但是时间分辨率越低；数值过小还会使低频成分丢失。最小的帧长至少应该包含乐音的一个基波。

⑯ 频率对应于时间轴线，振幅对应于电平轴线。波是无限光滑的，弦线可以看成由无数点组成，由于存储空间是相对有限的，数字编码过程中，必须对弦线的点进行采样。采样的过程就是抽取某点的频率值，很显然，在一秒钟内抽取的点越多，获取的频率信息更丰富，为了复原波形，一次振动中，必须有两个点的采样，人耳能够感觉到的最高频率为 20kHz，因此要满足人耳的听觉要求，则需要至少每秒进行 40k 次采样，用 40kHz 表达，这个 40kHz 就是采样率。我们常见的 CD，采样率为 44.1kHz。光有频率信息是不够的，我们还必须获得该频率的能量值并量化，用于表示信号强度。量化电平数为 2 的整数次幂，我们常见的 CD 位 16bit 的采样大小，即 2 的 16 次方。采样大小相对采样率更难理解，因为要显得抽象一点，举个简单例子：假设对一个波进行 8 次采样，采样点分别对应的能量值分别为 A1－A8，但我们只使用 2bit 的采样大小，结果我们只能保留 A1－A8 中四个点的值而舍弃另外四个。如果我们进行 3bit 的采样大小，则刚好记录下八个点的所有信息。采样率和采样大小的值越大，记录的波形更接近原始信号。

⑰ 由两个或两个以上不同的基音构成的不同谐波系列相互间产生干涉效应（包括同一个基音产生自我繁殖，它的奇数谐波成为新的基音产生属于自己的谐波系列）这种情况叫谐波失真。谐波失真的频谱较为复杂，没有统一的波形出现，而是多种波形混杂。

⑱ 也就是 Gerard Grisey 、Tristan Murail 提出的协和性判定标准——基音的“简单整数倍”泛音问题。这里必须指出，不同的声源其离散谱线的呈现是不一样的。即使同一个声源，采用不同的采样率去分析，也会得到不同的结果。因而上面提到的前八号整数倍谐波构成协和结构，不能教条地理解。在这里只是想通过这一例证来形象地解释协和结构问题。实际运用时还取决于作曲家的直觉经验与心理认知因素。

⑲ Dennis Gabor，匈牙利物理学家，1971 年获物理学诺贝尔奖。

第二章 泛音的作用

2.1 泛音与谐波系列

泛音是自然界中声音的自然属性，只要有声的存在，一般就有它的泛音存在。音乐中使用的任何一个音（包括乐音、噪音）都能无限向上扩展出它的泛音。在传统乐理中只是强调基音的前十六号泛音，认为十六号以后的泛音尽管存在，但由于人耳听不到，可以忽略不计。这种认识在今天看来存在许多不精确之处，需要修正。比如说音乐中的乐音是单独出现的吗？噪音就是没有固定频率的音？噪音的组成成分是什么？它又是如何分类？十六号以后的泛音是如何组织的？基音的谐波及谐波失真是如何产生的？共振峰与泛音有何关系？

通过频谱分析，乐音从来都不可能单独存在，比如小提琴发出的音总是伴随弓摩擦声出现，长笛发出的音总是与口风相伴而随，古琴的换弦、换把总是与触发的乐音一起出现。而且这些非乐音因素被当代音乐作曲家作为声音的独立要素，在作品创作中把它们等同于乐音来运用。即使把这些因素忽略不计，乐音本身是复合音，它的音高主要由基音的频率控制，而音色则由基音的泛音集合控制，基音产生的每个序号的泛音都是纯音。不仅如此，通过频谱分析发现，还有一些基音非整数倍的谐频也控制着音色，它们对倍频集合音色起润色作用，而这些音超出了传统泛音的范畴，甚至都不能再用泛音来命名了，那么这些音是些什么音呢？为了揭秘这个问题有必要先给基音、泛音、纯音、倍音、谐波系列做一个定义说明。

基音（Fundamentel tone），发音体全振动发出的基频称为“基音”，它决定音高和谐波系列。

泛音（Overtone），就是除基频以外的谐频。谐频却不一定是泛音，谐频有可能是非谐波的正弦波（在频率上比基频高，每一个正弦波都是一个纯音）。也就是说我们通常理解的泛音，只是基音的线性谐波产生的整数倍的谐频。这就相当于在真空中的自由落体，是一种假设的理想环境，而在真实的生活（空气）环境中，情况要复杂得多（有空气和其他杂质的浮力、地球引力、风雨等外界因素的影响）。同样的道理，即使我们不考虑

外界因素的影响，基音产生的质数倍谐频（如 3、5、7、11、13 号泛音……）也各自能成为新的基音产生属于自己的谐频，而这些谐频与原基音的关系就相当复杂，这种现象在高等物理中称为“谐波失真”。[①]

纯音（pure tone），只有基音而没有分段振动的倍音称为纯音，只含有正弦波。

倍音（Overtone），发音体振动时，除了全振动以外，各种长度的分段振动也在同时进行，全振动的基音与分段振动的音都称为倍音。根据分段振动与基音的关系，又可以分为整数倍的倍音和非整数倍的倍音两大类。比如弦长的一半发出基音的二倍音（比基音高纯八度），弦长的三分之一处发出基音的三倍音（比基音高纯十二度），弦长与发音的频率成反比关系，倍音主要反映了分音序数相对应的发音频率与基音频率的关系。

整数倍音：基音为 1 号倍音，而后按自然整数发展（2、3、4……），传统意义的泛音就是不包含基音的整数倍音，二倍音为第一泛音，三倍音为第二泛音，依次类推。

非整数倍音：指分段振动在基音的非整数倍上进行所发出的音。如膜振动的鼓与板块振动的钟，它们音响之所以不谐和，含混不清，主要就是非整数倍音大量存在。事实上，在弦乐、管乐这些相对协和的乐器中也大量存在这些非整数倍音，从波形频率的角度看，它们是由旁频与间谐波构成。

谐波系列（harmonics Series 或称为 partials Series）是指基频和那些高于基频的频率总称，基频的波形为基波，高于基频的波形为谐波，他们为声音加入了自己的音调颜色。基波和谐波之间的关系既可以是简单的又可以是非常复杂的。谐波系列主要由两部分构成：

基音的线性谐频——基音的整数倍谐频，简称“倍频”，它们都是正弦波，称为“谐波”。

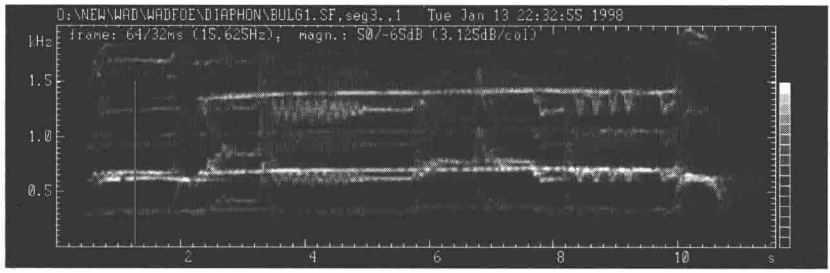
基音的非线性谐频——基音的非整数倍被抑制的谐频，它们通常为畸变的正弦波，由旁频、间谐波组成。

参见例 11 频谱图。

绿色亮光部分（图中最浅的部分）为基音的线性谐频（泛音），物理电磁学把它称为“倍频”。

紧紧靠着倍频的非线性谐波（非整数倍谐波），物理电磁学把它称为“旁频”。

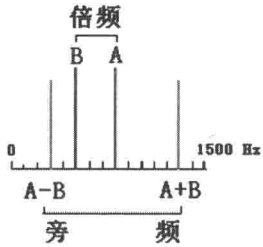
例 11：频率时间二维频谱



倍频间的非线性谐频，它们是偏离的正弦波分量，物理电磁学把它称为“间谐波”。

旁频属于间谐波的一种特殊存在形式，间谐波不一定是旁频。旁频产生的主要原因是频率间的自我繁殖作用，产生大量简单差音、立方差音及谐波失真现象。也就是说，在传统泛音的周围镶嵌着大量非线性、非整数倍的谐波，它们与泛音一起构成了声音音响世界。参见例 12。

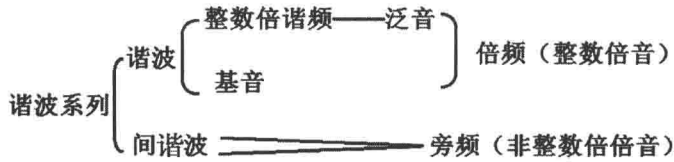
例 12：加减法合成旁频



上面的图例表示有两个音高分别为 500Hz 和 800Hz 的一对倍频 A 与 B，它们加减法合成分别产生 300Hz 与 1300Hz 的一对旁频，它表明在谐波系列中，各谐波之间能够相互作用，自我繁殖生成它们的子体系，这种加减法合成正是旁频生成的原因之一，它属于原形合成。事实上，旁频还可由变形合成产生，详细内容参见第五章频谱音乐的声音合成原理。

间谐波的产生原因，非常复杂，其中有自身的繁殖（如 1、3、5、7、11、13 号质数次谐波……各自能成为新的基音产生属于自己的谐频系列）；还有波的干涉（如相长干涉、相消干涉）、调制等因素的影响所致。

综上所述，我们可见谐波的外延和内涵都大于泛音。鉴于基音的线性和非线性谐频都是实际存在的事实，谐波这个名词应该广为我们音乐家重视和了解。应该注意谐波、泛音、间谐波、倍频、旁频的区别。谐波系列是谐波与间谐波的总称，它们的关系如下：



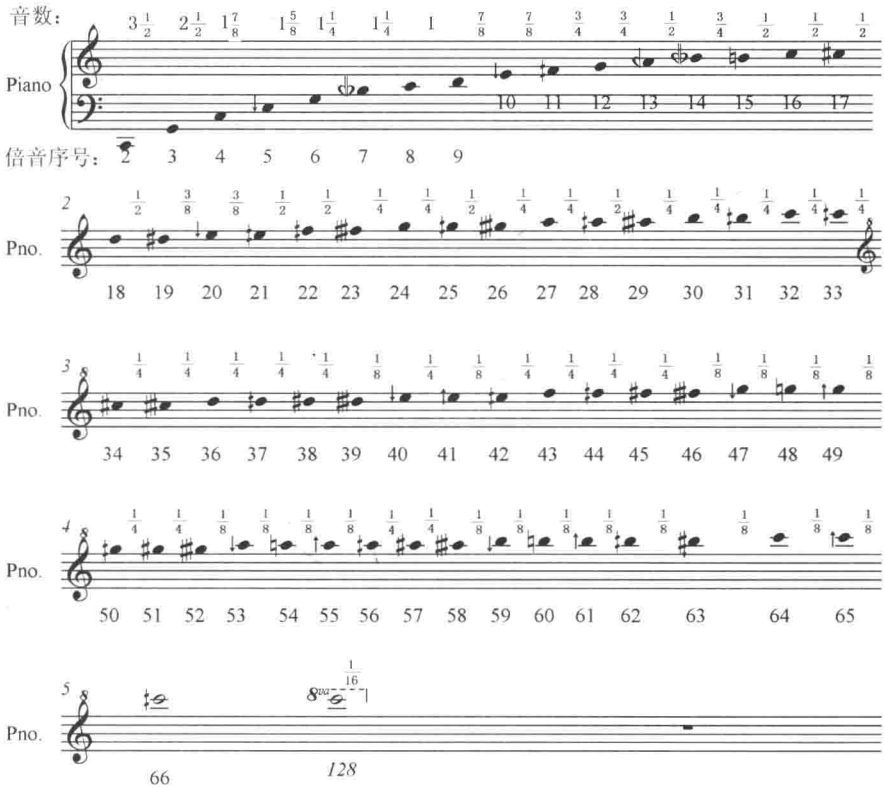
2.2 整数倍音列

通过 2.1 的介绍，我们知道了倍音的含义以及它与泛音的区别，泛音是不包括基音的整数倍音的转化体，倍音是包括基音在内的所有聚合为复合音的纯音总称。为了加深了解泛音与倍音的联系，本节暂不考虑非整数的倍音，而把研究重点放在整数倍音上。换种说法，就是重点研究传统律学中的自然泛音。必须要说明的是，千万不要把整数倍音与基本乐理中的基本音级等同起来，这是完全不同的两个概念。基本音级中的 C、D、E、F、G、A、B 是十二平均律制的大调音阶，它们的频率严格地说除了第一个 C 音及它的高八度 c 音形成真正的倍音（二倍音）以外，其余的音都不是倍音，它们都与倍音存在最小 2 音分，最大 24 音分的频率差，这正是十二平均律构造的和弦没有纯律、五度相生律协和的根本原因，十二平均律的最大优势就是解决了自由转调问题。五度相生律及纯律也不是严格意义上的倍音，它们与倍音也存在差异，只不过，这种差异性相对于十二平均律要小一些。十二平均律、五度相生律、纯律各自的生成规律及相互联系不属于本文的研究内容，需要了解可以研读缪天瑞先生的著作《律学》。可以说，律制的算法没有绝对的准确，只有相对的标准。各种律制都有自身的优点，又有缺点。这种优点加缺点的差异性就构成了各自的特点。例如国际标准音高在不同的时代和不同的地区也有所不同。

> 在欧洲，音的标准高度，从 17 世纪起，总的趋向是逐渐升高。在 17、18 世纪时，a^1 音的高度，其频率约从 415 到 430。到 19 世纪，在 1834 年，德国斯图加特物理学家会议决定 $a^1=440$。以后在 1859 年，法国巴黎音乐家和物理学家会议决定 $a^1=435$。并规定 $a^1=440$ 为“第一国际标准高度”；$a^1=435$ 为“第二国际标准高度”。
>
> 另外有一种标准高度，常用于物理学计算上，即 $c^1=256$，这种高度称为“物理学高度”，它的好处是便于计算 $2^8=256$，每低一个八度，均可以除以 2；每高一个八度，就乘以 2。[②]

我们不应该被不同标准、不同算法的频率差所蒙蔽，而要把注意力放到这些算法折射出的规律之上，掌握这些规律才是打开谐波系列倍音秘密的钥匙。同时，也不会再为倍音列中将出现微分音而不解，这都是十二平均律先入为主的缘故，倘若把十二音当成了标准，那么整数倍音的频率也就不标准了，多数会出现微分偏差。有鉴于此，我们把传统意义的自然泛音称为：理论泛音。下面就以钢琴最低的 C1（基础乐理中大字一组 C）为基音，以国际标准音高 $a^1 = 440Hz$ 为基准，推理出 C1 的频率是 32.592593Hz，以此为依据，完全按照倍音序号（注意：为了前后统一表中使用倍音序数，而没有用泛音序数，泛音序数只需相应倍音序数减一即可）的倍数关系（即不考虑倍音序号的比率关系的情况下），得出下列理论泛音的分布图。参见例 13。

例 13：理论泛音及其相邻音之间的音程间距



可见相邻序数泛音的频率差是固定在 32.59 Hz，在低音区，它们的音程跨度很远 1—2 号是一个八度；在后面相继出现纯五度、纯四度、大小三度、大小二度；注意：在 20—21 号倍音处，开始出现四分之一音，后续

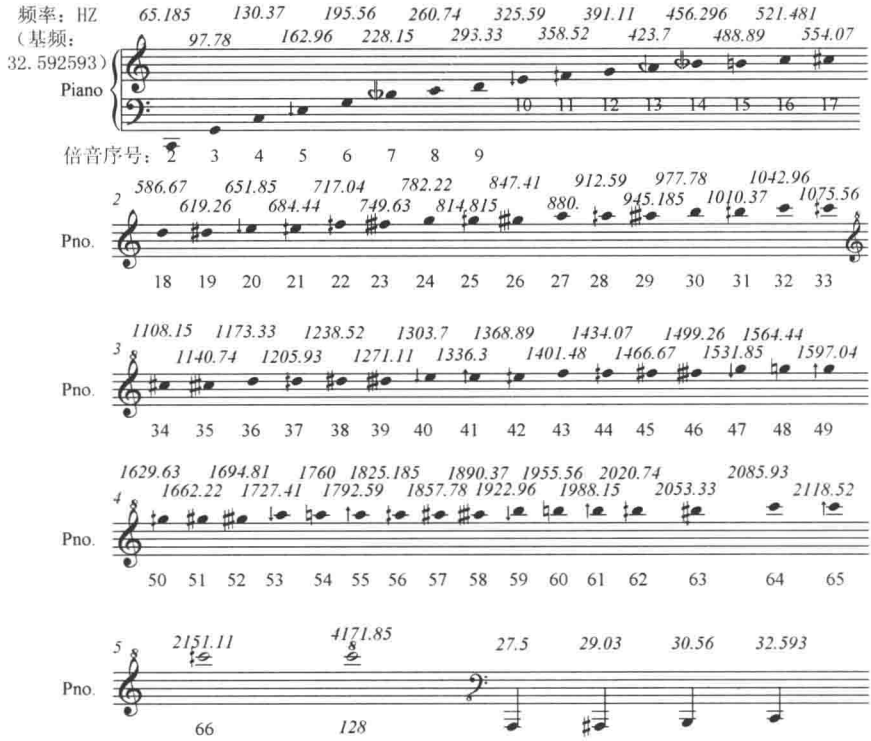
倍音中，还间插有二分之一音；40—41 号倍音开始出现八分之一音，后续倍音中也出现了三次四分之一音。越到高音区，倍音的间距越小，到了钢琴的最高音区的 c^5——下例的 128 号倍音已经出现了十六分之一音了。换句话说，c^5—降 b^4 的一个大二度距离里面相差的频率是：32.592593 ×16 =521.4815 Hz 。由于钢琴琴键是按照乐理中的大小二度来布局，常常使我们产生了一个错觉，以为相邻键的间距是一样的。事实上，从频率的角度来说完全不是这样。即倍音（或泛音）的序数相邻，并不等于琴键的音名相邻。

音程相同的任意两对音程（比如 c^1—d^1 与 d^1—e^1 都是大二度）的频率差都不等。

上表的 8—9 号倍音是 c^1—d^1，9—10 号倍音是 d^1—↓e^1，注意 e^1 降低了八分之一音，使得 d^1—↓e^1 不能成为真正的大二度了，虽然 8—9—10 号相邻倍音的频率是依次增加一个常数，但它们的音程却发生了变化。这从另一方面证明了上述结论。

钢琴的 88 个琴键（七个八度再加三个键）相邻键的音程是相等的，但相邻键的频率差是不同的。这 88 个键不是按照 1—88 号倍音序数来安排的，也就是说，它们根本就不是倍音，倍音的相邻，它们的频率差是固定的，但是音程距离却是变化的，倍音序数越大，相邻序数的音程距离越小，倍音序数与序数间的音程距离成反比关系。在此可以用弦乐器再作说明，我们知道，如果要在一根弦上演奏两个八度的音阶，越往高把位，手指的间距就越小，如果保持同样的间距在一根弦上演奏，根本不可能得到相同的音阶。可能有人会反驳，竹笛、唢呐等木管乐器它们的开口间距（孔间距）都一样，它们怎么可以奏出相同调式的双八度音阶呢？事实上，演奏家已经用嘴唇控制改变了气鸣的位置和方式，如果用恒定不变的气流来演奏无论哪一种木管乐器（特指孔间距一样的乐器），绝对不可能得到调式统一的音阶。管乐的嘴唇调节与弦乐的手指调节一样，需要多年的刻苦训练方能掌握。为了更清楚说明这一点，下面我们把整数倍音列的频率都标示出来，参见例 14 整数倍音频率表。

例 14：整数倍音频率表

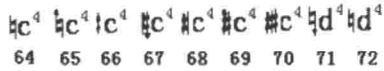


从表中可见钢琴最低音 A_2、升 A_2、B_2、C_1 的频率差分别是 1.528Hz、1.528Hz、2.033Hz，通过以上的分析可以得出：和声中强调的上密下疏中不空的原则，仅仅是倍（泛）音在谱面上的表象而已。要是从频率的角度来说，事实恰恰相反，越往低音区钢琴相邻音的频率差越小，越往高音区钢琴相邻音的频率差越大。因为在高音区有大量的微分音存在，相邻序数的高音区倍音都是以微分音的形式存在，比如上表 32 号倍音 c^3 与 36 号倍音 d^3 在钢琴上是一个大二度，但它们中间存在 33、34、35 号倍音，相邻倍音在这个音区是按照四分之一音向上做微分音调整。同样的道理，我们可以推出它们的高八度情况：

c^3 为 32 号倍音，它的高八度 c^4 的序数＝32×2＝64 号倍。

d^3 为 36 号倍音，它的高八度 d^4 的序数＝36×2＝72 号倍。

而 64 号到 72 号中间共包含了八个整数级，即



可见相邻序数倍音是按八分之一音向上依次递增，而每一个八分之一音在这个音区平均保持在 32.592593 Hz。那么 c4 与 d4 一个大二度的频率差就等于 32.592593×8＝260.74Hz，由此我们可以得到下列结论：

十二平均律调制的乐器（比如钢琴的88个琴键）相邻音的间距从音程上看都是一个小二度，是线性特征；可是从频率上看88个各键的间距完全不同，它反映出一种非线性特征。了解这点对于后面各章的内容具有至关重要的作用。

上面我们提取的32.592593这个常数是一个平均数，并不是绝对数。它是只考虑倍音序数的整倍数关系，算出来的，为的是与相应整倍数的积相吻合。比如表中27号倍音是a^2频率是第一国际标准音高的两倍880Hz，通过它我们就能算出基音的频率：

基音的频率＝880÷27＝32.592593Hz

这就是前文所说的只考虑倍数而没考虑比率关系的一种算法，这是为了强调整数倍音的序数关系，而采用序数与基数相乘的积来算出各序数的频率音高，它能浅显易懂地说明问题。必须说明的是，这种音高是整数倍理论音高，用十二平均律音高来衡量，它肯定是不准的，之所以要这样算是为了便于揭示倍音（泛音）列的规律，上述结论的规律是恒定的，重要的依据，它们不会因算法的不同而改变。

通过前面的论证，可以说，律学里面就没有绝对的准确数值之说，只有相对准确数。尽管这样，我们还是严格按照倍音与基音的倍数关系计算出了上表的频率数据，事实上，相邻各泛音的频率是一个比率关系，情况要比上面列举的复杂得多，频率值也相应要更加精确。但频率布局的总特征却是与上面图表一样。下面以十二平均律为参考，采用比率算法，更加精确地算出上述倍音（泛音）表的频率值。

首先要明确什么叫比率算法？五度相生和纯律的依据是什么？十二平均律到底在平均什么？是平均频率吗？

通过整数倍音列的说明，我们知道，基音到2号倍音是一个八度，推出所有音的高八度只需乘2即可；第2—3号倍音相距纯五度，它们的频率比正好是3∶2的关系，五度相生律就是根据三倍音对二倍音的比值来产生的。如：

$$g^1=c^1\times\frac{3}{2}；\ d^2=g^1\times\frac{3}{2}=c^1\times\left(\frac{3}{2}\right)^2$$

$$a^2=c^1\times\left(\frac{3}{2}\right)^3；\ \left(\frac{3}{2}\right)^n \text{表示向上生成了 n 个纯五度}$$

这就是五度相生律的秘密，这种律制的最大缺点就是五度向上（或向下）循环生成越多，音高偏差越多，最后都回不到起点了。例如以大字一组C_1作为起点连续向上生成十二次纯五度，可以生成c^5，按照五度相生

律的算法它的频谱应该为：

$$C_1-G_1-D-A-e-b-升\ f^1-升\ c^2-升\ g^2-降\ e^3-降\ b^3-f^4-c^5$$

$$c^5=C_1\times\left(\frac{3}{2}\right)^{12}=\frac{531441}{4096}C_1=129.7463C_1$$

但按照倍音算法却不是这个数，由大字一组 C_1 到小字五组 c^5 总共跨越七个八度，根据倍音的算法：

$$c^5=C_1\times2^7=128C_1$$

显然 129.7436 要大于 128，而且还大了不少。参见例 15，可见五度相生律与纯律的纯五度是一样的，都比平均律大 2 音分，那么连续生成 12 次纯五度，就会偏差 12×2＝24 音分，这 24 音分称为“最大音差”。(129.7463－128) ×C_1 得到 c^5 在两种律制中的频率差值，它转化成音分正好是 24 音分，有关频率转成音分值的算法参见缪天瑞先生的著作《律学》相关内容。

纯律的纯音程（一、四、五、八度）都与五度相生律是一样的，不同的是，纯律的大三度引入了倍音序数的 5∶4 比率关系，小三度引入了 6∶5 比率关系，使得纯律小三度大于平均律 16 音分，纯律大三度小于平均律 14 音分；而五度相生律正好与此相反，小三度比平均律小 6 音分，大三度比平均律大 8 音分。三律不同主要是表现在大小二、三、六、七这些音程上，详细数据参见例 15。

例 15：自然音程的音高和频率在不同律制的音分值对比表

音程名称	数比关系	五度相生律	纯律	十二平均律	所含半音数
	纯律频率比	音分值	音分值	音分值	
同度	1/1	0	0	0	0
小二度	16/15	90	112	100	1
大二度	9/8	204	204	200	2
小三度	6/5	294	316	300	3
大三度	5/4	408	386	400	4
纯四度	4/3	498	498	500	5
纯五度	3/2	702	702	700	7
小六度	8/5	792	814	800	8

续表

音程名称	数比关系	五度相生律	纯律	十二平均律	所含半音数
大六度	5/3	906	884	900	9
小七度	9/5	996	1018	1000	10
大七度	15/8	1110	1088	1100	11
纯八度	2/1	1200	1200	1200	12

纯律与五度相生律一样，随着次一级频率音高的不断生成，偏差会越来越大，最终没有办法回到起始音上去。尽管它最接近于整数倍音关系，是最协和的律制，但它仍旧不是真正的倍音，真正的倍音关系是在不断地自我调整之中，比如纯律大半音取的比率是倍音列中的16∶15的关系，从例13中可见序数17∶16与18∶17都是半音，但是，它们的比值是不同的，即：

$\frac{16}{15}>\frac{17}{16}>\frac{18}{17}$依次比值在缩小，表明半音距离在依次缩小。

继续向下发展，到25∶24的比率关系时，称为纯律小半音，纯律大半音为112音分，纯律小半音为71音分，两者竟相差41音分。可见同是半音，但间距是不一样的。

通过以上的论述，可见整数倍音与五度相生律、纯律最大的不同在于：

整数倍音的比率关系是动态变化。比如相邻序数“16－17－18”都是小二度音程递增，但是小二度的间距不同，中间存在微差。

五度相生律及纯律只是从整数倍音序数中提取典型比率关系，是相对固定的生律方式。

比如五度相生律只提取3∶2的关系来生成纯五度。

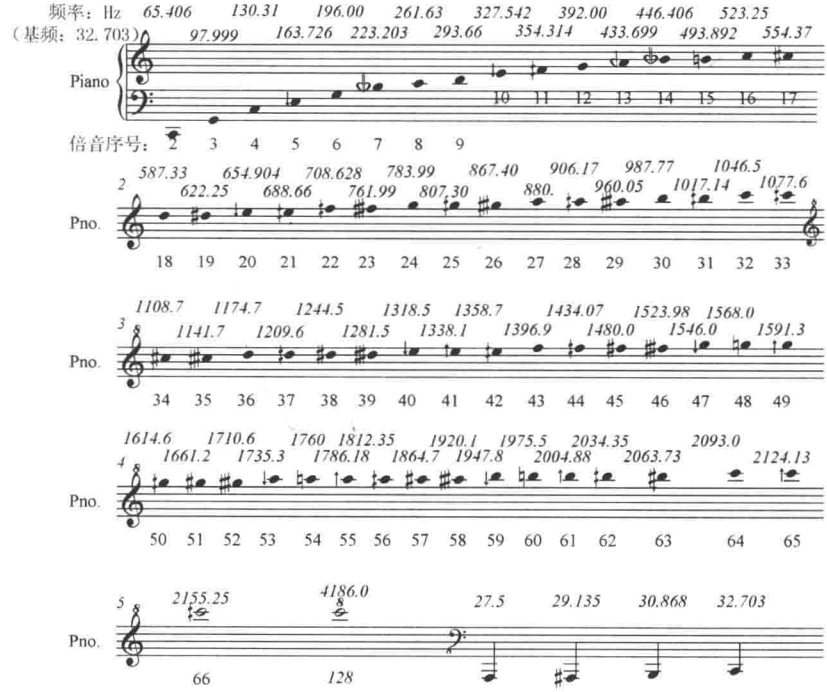
纯律除了继续运用3∶2的关系外，还加入了5∶4生成大三度，6∶5生成小三度，16∶15生成大半音，25∶24生成小半音，共提取了五组比率关系，因而它最接近于整数倍音的序数关系，但它毕竟不是完全的整数倍音关系。

十二平均律又取什么关系呢？

十二平均律提取的是二倍音与基音的关系，即2∶1的关系，它恰恰弥补了五度相生律与纯律回不到起始音的不足。任何一个音的高八度都是本音的二倍（序数、频率都是两倍），然后再把一个八度均分为十二等份，每一个等份称为“半音”（小二度），这事实上是在平均音程，而每两个相

邻音的频率差却不等，相等的是相邻音的频率比为$\sqrt[12]{2}=1.0595$，即把一个八度频率比“2”开12次方，算出相邻半音的频率比为1.0595这个常数，再把每一个半音分为100音分，进而可以算出微分音的频率。可见这种数学均分法得到的音，除了基音与它的八度音与倍音吻合外，其余的音都不在整数倍上，这就是十二平均律不协和的根本原因。必须说明的是，由于我们当代人在听觉上，以十二平均律先入为主，早已认为它是协和的，反倒难于理解整数倍音的音高听觉了，像5、7、13倍音比平均律低，11倍音比平均律高这些自然现象，反倒认为是不自然，这都是十二平均律惹的祸。在十二平均律频率表中（参见附录六《十二平均律各律音的频率》）5倍音为164.81Hz，7倍音为233.08Hz，13倍音为440Hz，而11倍音为349.23Hz，把它们带入例14与例16对比研究，就知道为什么在例中这些音要采用微分音记谱的原因了。事实上，无论是整数倍音算法，还是比率算法，它们都与十二平均律的结果不一样，但反映出的特征却是一样的，故此，它们的微分音记谱才能统一。参见例16。

例16：比率计算泛音表频率图



上面无论是整序数计算，还是比率计算得到的频率值都属于理论泛音值，而现实中的不同乐器，由于其物理属性的不同，谐波失真的大量存在，使得各自实际的泛音呈现得更加复杂，下一节就以钢琴为例，用实验

手段来测试出钢琴的实际泛音情况，以下称“实验泛音”。

2.3 实验泛音

实验泛音就是指以实验数据为准的现实泛音，下面以法国国家电子实验中心 IRCAM 在 1980 年的实验数据来说明钢琴 C_1 的实验测试泛音情况。参见例 17。

例 17：1—116 号泛音振幅数据

Piano C_1

118 comp.detected
91 comp. retained

倍音序数	振幅数据	倍音序数	振幅数据	倍音序数	振幅数据
		31	0.0524	62	0.0031
		32	0.007	63	0.0071
2	1	33	0.0562	64	0.0214
3	0.2632	34	0.0819	65	0.0183
4	0.5014	35	0.168	66	0.0059
5	0.5449	36	0.1121	67	0.0022
6	0.5437	37	0.1963	68	0.0148
7	0.9649	38	0.1002	69	0.006
8	0.0044	39	0.00435	71	0.0191
9	0.2341	40	0.0132	72	0.0161
10	0.4108	41	0.0319	73	0.0147
11	0.8698	42	0.1195	75	0.0086
12	0.7026	43	0.1208	76	0.0053
13	0.7035	44	0.0266	77	0.001
14	0.0308	45	0.0502	78	0.0044
15	0.2754	46	0.0198	81	0.0035
16	0.0095	47	0.0298	82	0.0013
17	0.2392	48	0.0066	83	0.0018
18	0.1949	49	0.0108	84	0.0037
19	0.3947	50	0.0245	85	0.0049
20	0.2605	51	0.0755	87	0.002
21	0.6908	52	0.0313	88	0.001
22	0.1876	53	0.0359	89	0.0014
23	0.3141	54	0.035	91	0.0019
24	0.0164	55	0.0101	94	0.001
25	0.0484	56	0.004	95	0.002
26	0.0538	57	0.0151	96	0.0021
27	0.3454	58	0.0034	98	0.0098
28	0.34	59	0.012	101	0.0011
29	0.4836	60	0.0179	114	0.001
30	0.2855	61	0.0062	116	0.0018

（摘自 analysis carried out at IRCAM in the 1980s Contemporary Music

Review / volume 24 Number 2/3 April/June 2005，p. 192）

表中设定 2 号倍音的振幅为整数 1，其余各倍音以此为标准，作非线性变化。公式可以参考本书第一章注释④傅立叶级数的数学表达：A_n 的算法，A_n 表示 n 次谐波的振幅。表中的数据为傅立叶转换计算的结果。

加粗黑体字的振幅明显要大于灰体字的振幅，我们把它称为“共振峰”。以下是 2—50 号泛音的共振峰分布统计数据。

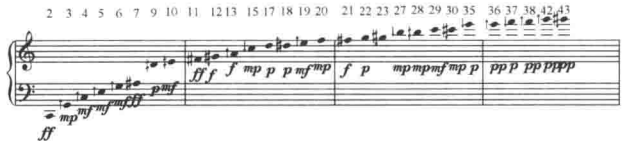
例 18：2—50 号共振峰划分

倍音序数	振幅数据	倍音序数	振幅数据
2	**1**	**27**	**0.3454**
3	**0.2632**	**28**	**0.34**
4	**0.5014**	**29**	**0.4836**
5	**0.5449**	**30**	**0.2855**
6	**0.5437**	31	0.0524
7	**0.9649**	32	0.007
8	0.0044	33	0.0562
9	**0.2341**	34	0.0819
10	**0.4108**	**35**	**0.168**
11	**0.8698**	**36**	**0.1121**
12	**0.7026**	**37**	**0.1963**
13	**0.7035**	**38**	**0.1002**
14	0.0308	39	0.00435
15	**0.2754**	40	0.0132
16	0.0095	41	0.0319
17	**0.2392**	**42**	**0.1195**
18	**0.1949**	**43**	**0.1208**
19	**0.3947**	44	0.0266
20	**0.2605**	45	0.0502
21	**0.6908**	46	0.0198
22	**0.1876**	47	0.0298
23	**0.3141**	48	0.0066
24	0.0164	49	0.0108
25	0.0484	50	0.0245
26	0.0538		

表中每一个粗线框都表示一个共振区间，在每一个区间里只有一个最大的振幅，相应序数的音称为共振峰音。比如在第二个框里 11 号为共振峰音。仔细对比研究，会发现共振峰多数情况是位于质数、奇数上。

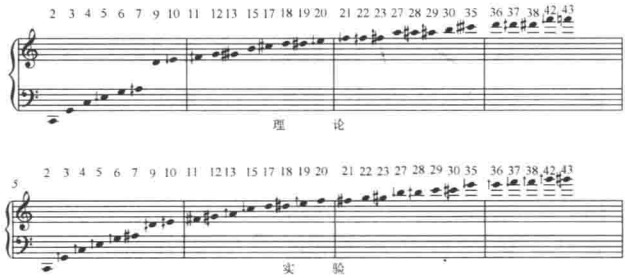
根据上面的振幅数据，把它们转化为力度等级，同时过滤掉振幅弱的分音，得到下面 2—43 号泛音表：

例 19：过滤后的 2—43 号泛音音高及力度分布图（序数按照倍音提取）



仔细观察上例的音高会发现，它与例 13 呈示的理论泛音存在出入。详情请看下面对比谱例。

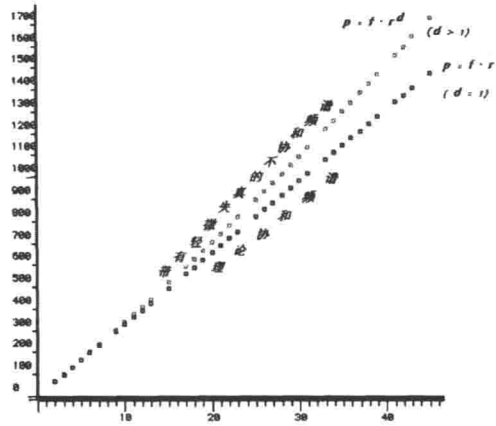
例 20：理论泛音与实验泛音的音高对比（序数按照倍音提取）



可以看到同样的基音，钢琴测试的实验泛音要高于理论泛音，这是什么原因造成的呢？这是由于钢琴的频谱带有谐波畸变，从而造成了分音失真，使得它的实际音高略微偏移了理论音高，最终加强了钢琴音响的不协和性。

上述情况可以用 $p=f\cdot r^d$ 这个公式来形象表述。其中 p 等于各谐波频率（the frequency of the partial）；f 为基音频率（the fundamental frequency）；r 为谐波序数（the harmonic rank）；d 为失真量（the power of distortion）。当 d=1 时，上面公式为：p=f·r 表示为协和频谱，没有失真，线性反映；当 d>1 时，表示频谱为扩大失真；当 d<1 时，表示频谱为压缩失真。都为非线性反映。见例 21。

例 21：理论泛音与钢琴测试泛音函数图解



事实上，除了钢琴的谐波系列具有轻微失真以外，还有许多乐器都有这种现象。只不过，有些谐波畸变是乐器固有的属性（比如打击乐最为明显，金属打击乐多为“粉色噪音”，谐波失真明显，皮制打击乐已经成为“白色噪音”，所以最不协和），有些谐波畸变可以人为造成（比如在弦乐器上可以很容易提升或压缩谐频音高，从而造成不协和频谱；铜管乐器也同样容易做到；相对来说木管乐器的谐波要少一些，所以它们更加协和）。详述参见后面内容。

2.4 共振峰泛音与质数泛音

通过理论泛音与实验泛音的对照，我们知道了并不是所有序号的泛音在实际乐器演奏中都“完整出现”。事实上，有许多泛音都被同区域振幅强的分音屏蔽掉了，干涉作用使得某些泛音“隐身”，另一些泛音“凸现”，这种现象被称为“掩蔽效应”[③]。这种你消我长、此起彼伏的掩蔽效应在谐波系列中非常普遍。正是由于这个特性，才使得频谱成为离散图，各谐波组合成收敛型的包络。实际上小提琴、大提琴、黑管、风琴、长笛、小号、定音鼓、钹、钗、沙锤等之所以音质不同，就是因为它们的复合波的组成不同，共振峰不同。理论上，不管什么乐器，它的谐波生成原理是一样的。只是由于材质、发生方式、形状尺寸等参数的不同，使其固有的频率区间的范围不同，从而对谐波系列的区间（阶段、局域）的扩大作用不同，当谐波系列中的分音频率与乐器共鸣箱频率接近（或是完全相同）时，就出现振幅最大的共振峰。

例 22：部分乐器共振频率范围（其他乐器参见附录五《乐器的重要频率范围表》）

小提琴	共鸣箱较小	共振频率高	256—1100Hz
大提琴	共鸣箱增大	共鸣频率低	110—400Hz
贝斯提琴	共鸣箱最大	共振频率更低	80—350Hz

萨克斯管体：

左右手指全按下	共振腔容积最大	共振频率低	发低音
右手指抬起	共振腔容积缩小	共振频率提高	发中音
双手全抬起	共振腔体最小	共振频率最高	发高音

共振峰的分布还具有相对性，即谐波系列被分成若干个区间，每一个区间内有一个相对最大的共振峰。详情请参见上节实验泛音的例 17。对照数据，可以发现多数共振峰泛音正好位于泛音序号的质数位置（如 2、3、

5、7、11、13、19、29、37 号泛音，只有少量例外，如数据中的 12、21、42 号泛音）。这个现象正好与物理电磁学中的谐波失真吻合。在电磁学中，谐波失真主要由于质数倍谐波的振幅较强，它们可以成为“新的、独立的基音”，从而产生依附于自己的谐波系列，这些新产生的谐波系列之间，以及它们与原始基音的谐波系列之间产生强烈的干涉作用，造成谐波失真的发生。可见质数泛音既是协和的坚决捍卫者（形成共振峰和弦，参见下篇和弦建构论述），又是不协和的制造者（促使谐波失真的发生），质数泛音具有双重作用。由此可以得到下列结论：

（1）质数泛音具有双重作用，自身构成协和的使者；繁殖构成不协和的簇拥。

（2）共振峰泛音是音质的主要缔造者，在泛音列中起着主要的作用。

（3）非共振峰泛音在乐器的音响、音色中起辅助作用。

在当代音乐作品中，由于越来越重视音色的作用，不协和性也得到了极大的解放，它们都促使我们要善于运用共鸣原则、非共鸣原则以及人工可调节共鸣等原则。最大限度地去还原原生态的声音、创造新的音色、构建属于自己的“音色化合模式系统”。为此，质数与共振峰泛音就成为了作曲家起步的始点，作品材料的源泉。

2.5 微分音的出现条件

从上面理论推理中，可见有大量微分音的存在，高序号泛音及高频率音区里，这种现象更为普遍。这要求我们相应要采取更加精确的量化音级级数的单位，十二平均律显然不能满足要求了（比如 5、7、11、13 号这些低序数的倍音，它们也不是十二平均律的音高，而与此具有微差，必须要用微分音记谱才能准确反映）。其实这不是一个新问题，相反是个早已存在的老现象。在东亚、中亚（中国、印度、阿拉伯及伊斯兰教国家）的民间音乐中微分音大量存在，即使在西方，在十二平均律产生之前，就已经有毕达哥拉斯律、纯律、中庸全音律的存在，伴随着它们的音差研究，相继有十九平均律、三十一平均律、五十三平均律、不规则律等律制的产生。在十二平均律未成为统一的度量衡以前，可谓天下大乱，五彩斑斓，各种律制并存于天下。十二平均律及功能和声统治地位的确立，既是好事，又是坏事。好在它能使调性音乐在各种大小调体系里自由转调，而且解决了从某一个音出发，又能回到该音的历史性问题。就像当今电子音乐中的 MIDI 协议，它使得世界上各个厂家生产的电子设备都有统一的接口，

即插即用。但是另外也有一些厂家为了保护自己的知识产权，确保自身的独立性、唯一性，同时还预留了自己独立标准的专业接口，这才保证了世界的多样性。十二平均律及功能和声正好破坏了世界的多样性，不自觉地成为了古今联系的屏障，一叶障目，不见泰山，阻碍了血脉的正常传承。所以更精确的微分音的使用，在今天就显得尤为重要了。那么从泛音的角度来看微分音，它的出现需要具有什么条件呢？

需预先说明的是，以下研究的微分音主要是指相邻序数出现的微分音程，不包括不同律制的频率、音分微差。也就是说，不在不同律制中，研究它们的差异性。因为不同的律制有不同的量化标准，得到的结果也是不同的，需要了解不同律制各音的频率情况可以去查阅缪天瑞先生的著作《律学》的相关内容。下面我们以基音产生的泛音，即谐波系列为研究对象，以钢琴为实验工具来看微分音程最早出现的音域情况，这种研究的结果有助于我们在音乐的创作之中，合理地处理“同一声场”的纵横结构，使得微分音程的出现符合声场的自然属性。

通过上述理论泛音表可以看到，在只有一个基音的情况下，小于小二度的微分音程，最早在 20 与 21 号倍音处出现（1/4 音高），如果以钢琴最低音 A_2 为基音，它的 20 号泛音为升 c^2，21 号泛音为升 $3/4c^2$，见例 23A；在两个基音的情况下，钢琴最低的微分音程出现的下界线在 A_2 的第七号泛音降 1/4g，与 B_2 的第六号泛音升 f 上成立的 1/4 音程处。

参见例 23B。下述结论只需把两个基音的泛音表列出就能一目了然，在此过程从略。

例 23：自然微分音程出现的下界线

上例告诉我们：

（1）在一个基音的情况下，不可能在升 c^2 以下存在微分音程。即便是在具有谐波畸变的乐器上（不包括打击乐），也不可能存在。

（2）在两个不同基音的情况下，最低音域出现的微分音程，理论上在升 f 以上出现，低于此音的音域，理论上不会出现微分音程。

如果在升 f 以下出现了微分音程怎么解释？可能是出于下列三种情况：

（1）有效低音向下扩展，比如电钢琴的总音域是 C_3—g^6，高低音域都分别比钢琴扩展了纯十二度和大十三度。

（2）人工调制产生了非线性谐波畸变，造成分音失真。

（3）模拟低音打击乐音效（如大鼓）。

在两个（或两个以上）的基音的情况下，基音间的距离越大各自的独立性越强，谐波与谐波系列的干涉越少，在不考虑间谐波的情况下，仅仅存在局域模糊效应。相互的关系越弱，基音的间距越小，尤其是在临界带宽以内的基音之间，它们的谐波与谐波系列发生拍频及化合作用，可以产生全域模糊效应（在三个或三个以上的临界基音下，表现得更加显著）。各自的独立性减弱，相互的依存关系加强。

注释：

① 谐波失真是高等物理的专业问题，广泛应用于声学、电磁学、微波通信等领域，属于物理学前沿研究课题。

② 缪天瑞：《律学》，人民音乐出版社 2002 年 5 月第 6 版，第 18 页。

③ 一个较弱的声音（被掩蔽音）的听觉感受被另一个较强的声音（掩蔽音）影响的现象称为人耳的“掩蔽效应”。

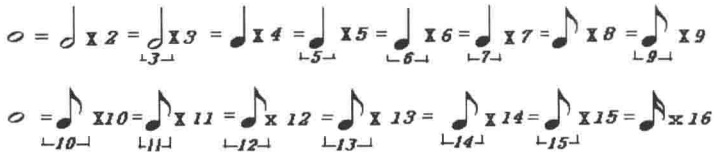
第三章 音乐的结构力因素

音乐的结构力是包含了纵、横、深三维及时间作用于它们的四维时空矢量的合力作用的结果。直接从谱面反映的结构力因素就有旋律、节奏、和声、速度、音色、力度变化、发音法、急缓法、复调、曲式、声音合成、配器等信息。过去习惯于用作曲“四大件”来揭示，随着20世纪后半叶以来思想风潮的风起云涌、个性解放，一大批作曲家决裂、否定、背弃了传统的音乐价值，追求艺术表现的绝对自由，创作出大量风格迥异的作品，从多方面、多角度地探讨和深化了传统“四大件”的内容，扩展了音乐的结构力因素，把过去认为次要的，依附性、非独立的表现手法（像微分音、音色变化、力度变化、发音法、急缓法、声音合成等因素）提升到了独立的、具有同等意义的结构力因素来看待。引用最新的科技成果、电子音乐的知识于管弦乐写作之中（在一定意义上说，科学成果的渗入成为了频谱音乐，声音生态学发展的显著标志之一）。在此，结构力因素的分离与综合作用的辨析与论证就成为了揭秘频谱作品组织结构的钥匙。为了便于理解和论述，让我们先过滤掉音乐的外在形式，引进自然科学的最新研究成果——计算机图形学[①]的研究方法，首先建立一个三维基本参数，以便能够客观、量化地去分析构成音乐的所有结构性因素。下面我们从维的角度来找音乐的基本参数，首先看横坐标X轴。

3.1 X轴的参数

目前，我们研究的参数信息是以“微观入手”，像曲式、和声、复调、配器这些“宏观问题”暂时不列入考虑范畴。那么在水平横坐标X轴上，音乐结构的最直接的因素莫过于节奏了，因此把X轴作为节奏数值轴来作为我们将要研究的第一个对象。以下为便于理解，我们把一个全音符作为一个整数一，伴随节奏值的依次缩小可以得到如下划分：

例24：单位节奏值递减图



（1）单位节奏值：通常以研究对象的最小节奏时值作为单位。如上例每一个等式中的音符时值就是单位节奏值。

（2）节奏数比：把旋律声部的各个发音点的节奏值，通过数比关系表现出来。它能够量化地反映旋律节奏的急缓变化情况。

3.2 Y轴的参数

从微观角度来看纵坐标最该引起注意的就是频率差，但是在实际作品之中没有人在总谱上去用频率数字记谱，这样反倒会弄巧成拙，那么标识音程差的“音数”就成为了首选目标。

（1）音数：用来作为带宽的单位。根据作品律制及所组成的音阶结构的不同，可以采用相应的量化标准。因为到目前为止，包括频谱音乐在内的当代音乐作品中，出现的最小音程单位是1/8音，虽然理论上还有更小的音程存在，但对于音乐作品的实际演奏，其意义甚微，仅仅是对律学的研究意义重大一些，故而我们把最小的音程量化值（定为1/8），详情请参见附录十。

表中把一个八度内的音数值定为6，即六个全音。在此，我们把积数6作为一个恒定的常数，根据公式：均分数×音程音数＝6，可以推算出下列结论。一个八度里包含：

1×6＝6	一个六全音	
2×3＝6	两个三全音	
3×2＝6	三个二全音	（即三个大三度）
4×3/2＝6	四个二分之三全音	（即四个小三度）
6×1＝6	六个全音	（全音律）
8×3/4＝6	八个四分之三音	
12×1/2＝6	十二个半音	（十二平均律）
16×3/8＝6	十六个八分之三音	
18×1/3＝6	十八个三分之一音	
24×1/4＝6	二十四个四分之一音	（二十四律）
30×1/5＝6	三十个五分之一音	

36×1/6=6　　三十六个六分之一音　（三十六律）

42×1/7=6　　四十二个七分之一音

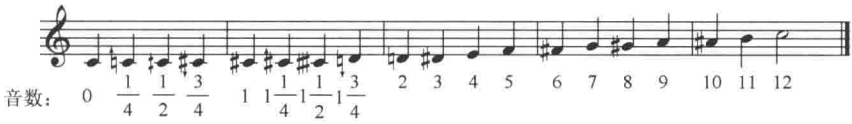
48×1/8=6　　四十八个八分之一音　（四十八律）

……

音程的起点，同度规定为零。由于这个起点的选择是相对的，因而音数还是一个矢量，即它具有方向性，高于起点音的音数为正；低于起点音的音数为负。

（2）邻点差：指相邻音的音数差，它可以反映出构成旋律（或和弦）音的时时变化情况。参见例 25。

例 25：一个八度内的音数标记



（3）带宽（Bandwidth）：是一个相对大一点的单位，表示纵向写作总的音域。可以细分为旋律带宽、和弦带宽，等等。带宽由旋律（或和声）最高点的音数与最低点的音数的差来表示。如果说带宽是相对宏观、整体研究纵向信息，那么邻点差就是微观、局部解剖纵向信息。

3.3　Z 轴的参数

Z 轴（即深度轴）的参数建立是最困难的事情，它没有一个固定的模式。根据不同的目的，可以提取不同的对象作为参数。尽管没有统一模式，但还是可以从以下几个方面来分别建立 Z 轴参数。

（1）以时间为深度内容

单位：秒（s）、毫秒、（ms）、微秒（μs）、纳秒（ns）

作谱例分析时，以秒（s）为单位；频谱分析，以毫秒（ms）为单位；若用精密仪器分析谐波与任意波形，时间单位还可以精确到微秒（μs）、纳秒（ns）。

（2）以声强级为深度内容

声音的传播实际上是振动物体能量的转移，声能与振幅、音量成正比关系；振幅、音量的谱面表达是通过力度级来反映的。所以，声强级的参数提取分为下面两种情况：

①在不使用仪器，只做谱面分析的情况下，声强级可以直接转化为力

度级来表示。

单位：ppp、pp、p、mp、mf、f、ff、fff。

②在使用仪器的频谱分析中，声强级用分贝表示。

单位：分贝。

这两者的关系参见例 26。

例 26：一般情况下交响乐队的总体音响动态范围

力度	pppp	ppp	pp	p	mp	mf	f	ff	fff	ffff
分贝	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB	60 dB	70 dB	80 dB	90 dB	100 dB	110 dB

例 27：一般情况下声音的分贝水平

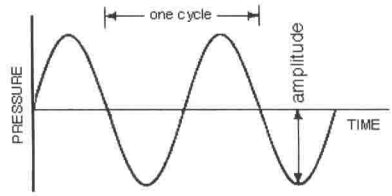
最低听阈	0 dB	摩托车发动（30 英尺）	88 dB
树叶瑟瑟、沙沙声	20 dB	搅拌机（3 英尺）	90 dB
安静耳语（3 英尺）	30 dB	地铁站	94 dB
室内谈话	40 dB	柴油机卡车（30 英尺）	100 dB
安静街道	50 dB	割草机启动（3 英尺）	107 dB
正常谈话	60 dB	风动铆接机（3 英尺）	115 dB
车内	70 dB	电动钢锯（3 英尺）	117 dB
高声演唱（3 英尺）	75 dB	摇滚音乐 、痛阈（6 英尺）	120 dB
汽车发动（25 英尺）	80 dB	喷气飞机（100 英尺）	130 dB

（3）以波形种类和谐波分布为深度内容

这个深度内容需要借助专门仪器的测试才能进行，它本身也具有三维性，即时间—振幅—谐波数。我们把这种三维属性称为“子三维”（交混三维），这是相对于基本三维参数而言，因为它们有相交性，又有延伸性，因而把基本的叫“母体”，延伸的叫“子体”。

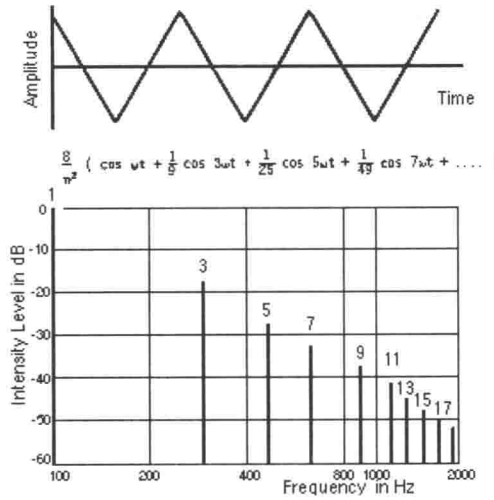
正弦波（SineWave）②，正弦声波是一种没有任何谐波的简单纯净的声音，即只有一个基频。之所以称作“正弦”音，是因为在图表显示中，正弦波波形振动曲线是随三角函数正弦曲线的规律来变化的。在交响乐器中短笛最接近正弦波。参见下面例 28 时间—振幅二维图。

例 28：正弦波



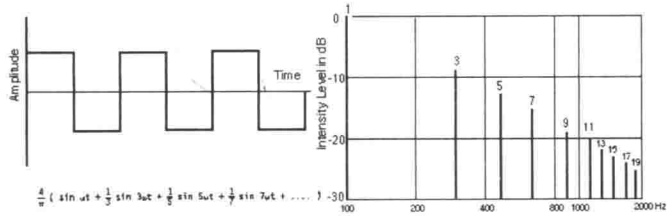
三角波（Triangle Wave）[3]，三角声波与正弦声波类似，但不如正弦声波干净，因为他带有一些谐波。三角波的形状包含两个线性阶段，三角波的泛音的位置落在其奇数的地方。三角波第一泛音可以明显地辨别出来，而其他泛音能量很小，因此我们经常将三角波误认为正弦波。参见例 29。

例 29：三角波及其谐波分布



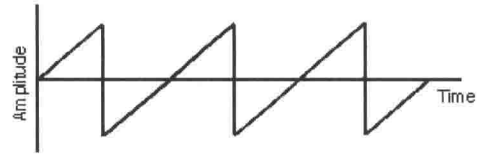
方波（Square Wave）[4]，方波的泛音只落在奇数位位置，方波有着丰富的泛音内容，听起来很空泛，其产生的声音效果正好与正弦音形成“贫富对比”，由于其丰富的声音资源，电子音乐常用它来作为音源发生器。在交响乐器中单簧管的声音以方波为主。方波也可看成是特殊的脉冲波。参见例 30。

例 30：方波

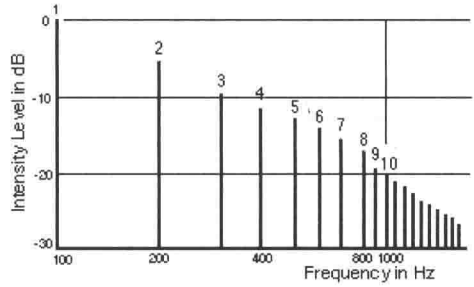


锯齿波（Sawtooth Wave）[5]，锯齿波的形状类似于三角波，但锯齿波包含了奇数与偶数（所有的谐波）泛音，只是分为正向（Positive Sawtooth）和反向（Negative Sawtooth），锯齿波的声音听起来非常明亮。在铜管和弦乐的乐器声音中主要分布为锯齿波。参见例 31。

例 31：锯齿波

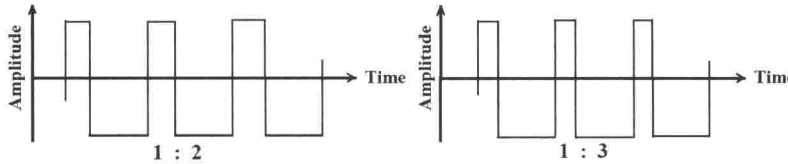


$$\frac{2}{\pi}\left(\sin \omega t - \frac{1}{2}\sin 2\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t - \frac{1}{4}\sin 4\omega t + \dots\right)$$



脉冲波（Pulse Wave）[6]，将方波在时域上变化正负级长度，从而带来频谱的变化，就形成了脉冲波。脉冲波与方波比较接近，都拥有丰富的泛音，因此有些教科书将两者视为一类（事实上不同）。脉冲波的最大特点是会随着时域变化与所设定的参数来变化调整泛音数，泛音的多少取决于脉冲波形状的变化。一般来说，波形的曲线越尖锐，频谱内容越丰富。脉冲波同时含有奇数、偶数次谐波，但呈鼓包状，通常簧片乐器呈现脉冲波特点。

例 32：脉冲波



方波波形上方最大振幅持续时间与一个周期的持续时间之比为 1∶2，我们就说它的占空因数（Duty Cycle）为 50%；而例 32 中左图和右图的脉冲波的占空因数分别为 1∶3（33.3%）和 1∶4（25%）。一般来说占空因数都是小于等于 50%的，如果一个波形的占空因数为 60%，那么很显然，这是一个占空因数为 10%（60－50＝10）的脉冲波反相后得到的。不同占空因数的脉冲波，声音性质是不同的，人耳听起来的感觉也是不同的，5%到 10%的脉冲波听起来很细，像鼻音，可以用来模仿双簧管的声音。随着占空因数的增大声音越来越厚实，接近 50%时可以模仿单簧管或其他木管乐器的声音。

以上的占空因数概念，目的是引出谐波丢失概念。也就是拥有 1∶n 占空因数的脉冲波，其 n 次谐波将会丢失。

比如方波（也就是特殊的脉冲波）的占空因数为 1∶2，那么在方波中只有 1 次、3 次、5 次、7 次……奇数次谐波，偶数次的谐波都丢失掉了。

再说例 32 的左图中，占空因数为 1∶3 的脉冲波，其中只有 1 次、2 次、4 次、5 次、7 次、8 次……谐波，3 及 3 的倍数的谐波都被丢失掉，而右图中占空因数为 1∶4 的脉冲波，其中只有 1 次、2 次、3 次、5 次、6 次、7 次、9 次、10 次……谐波，4 及 4 的倍数的谐波全部丢失。

上面介绍了占空因数的比值分别为整数的情况，如果它不是整数的时候呢？比如 28.5%的情况下，谐波丢失都是怎样的呢？答案很简单，因为 28.5%界于 1∶3 和 1∶4 之间，所以 3 次和 4 次谐波都被削弱了，但是都没有完全丢失掉。

（4）以数据包络为深度内容

数据包络不是单维的参数，它本身就是一个二维函数，数据包络是利用包络曲线作统计、对比分析，估价出有效生产前沿的信息。音乐中使用的包络分析，主要是 ADSR 音量·时间包络，以及由它反馈控制的音高、音色包络等。详细内容请参见第一章《频谱基础》之 1.4《时间过渡性》的介绍。

（5）以共振峰作为深度内容

它也是频率—振幅二维参数。

共振（Resonance），一个振动系统，当外加的策动力的频率与系统本身的固有频率很接近或相同时，系统受迫振动的振幅将趋于最大值，这种现象叫“共振”。

共振峰（Formant），指发生共振的振幅最大值。相对应的频率称为“最大共振峰频率”。

共振峰区间（Formant Regions），指共振曲线的波峰与波峰（也可以是波谷与波谷）的间隔区域。

共振峰是音质、音色研究的重要参数。共振峰产生必须要有两个重要因素，即内在发声器，如小提琴琴弦发音；外在共鸣体，小提琴琴体共鸣箱。

同一共鸣箱的共振峰区域是固定不变的，它仅对某一端（或几段）频率区间的音形成共鸣效果，基音低于共振区间的音，由于它的上方有大量谐波的存在，在共振峰区间的谐波得到扩大共鸣，因而声音丰满、圆润；基音位于共振峰区间以上的音，由于没有谐波在共振区间内，因而声音干

涩、压抑。同一个乐器，由于共振峰区间的固定，尽管它的高低音域、音色有差异、表现微不同，但音质是固定不变的，这就是小提琴之所以是小提琴的原因。

（6）音色作为深度内容

这是目前在上面列举的五组深度内容中最复杂、最难建立的参数，因为它牵涉的面太多，本身就是一个多维的、具有独立且是交叉学科意义的概念。其概念之大非自然科学技术能够囊括，它还存在心理认知、感觉、精神、哲学、美学等社会科学的问题；存在宗教信仰，甚至是巫术领域的价值观念问题。谈论音色，想不去涉足音乐的外在形式，以及音乐以外的、与之联系的内容、形式，几乎是不可能的！同一种音色被不同人，甚至同一人在不同的时候，不同的解读的现象大量存在。音色如同自然界万紫千红的色彩一般，给人展现最复杂丰富的变化，有资料显示，“一般人的一生大概能听到一亿种以上的不同音色”[⑦]。相对于音色丰富细腻的变化，人的语言是贫乏的！

但音色又是当代音乐中突破最多、成果丰硕的领域。音色音响化音乐几乎就是当代音乐的代名词，所以它是音乐分析中不可回避的重要因素。宏观地说，音色可以看成是基本三维参数的一维。微观地说，音色自身就是多维。下面我们仍然只从量化的角度，滤除掉音乐的外在形式及音乐以外的相关内容，把决定音色的重要参数列举出来。

音色（音品），指声音的音调和响度以外的音质差异。

它与声音的频谱结构、包络和波形有关。发音体的泛音结构不同频率特性曲线、种类不同造成音色结构的不同。

影响音色的因素[⑧]：

a. 结构不同：弦、簧片、金属

b. 质料、质地不同：金属、人体、电子

c. 激发方式和激发位置不同：气息、声带、吹奏或拉奏、指板或琴马

d. 力度大小不同：p、f（弱、强）影响音色

e. 共鸣体（箱、腔）大小不同：影响单元色的泛音结构

f. 振动体的弹性：影响音色的始振特性和衰减特性

①声带：儿童——富有弹性、音色清脆明亮

成人——声带松弛、音色苍老

②哨片：软——始振性慢、衰减也慢

硬——始振性快、力度大、衰减也快

g. 密度与微粒持续时间之间的关系也会带来音色的变化

（7）以声相作为深度内容

声相与方位感已经越来越受到当代音乐作曲家的重视，他们在创作的案头准备期间，就已经充分地研究了声相布局的可能性，利用人们听觉双耳效应的时差原理，甚至于利用人们视听觉的错位，建立一种动感的音响空间。其中主要参数如下：

混响（Reverberation）：当反射声同直达声的时间差小于 50ms 时，称为有用反射声，有用反射声不仅不影响声音的辨析，而且会丰富和加强直达声。当原始的直达声同许多不同方向、不同时差的有用反射声混在一起时，就被称作混响。

回声（Echo）：超过 50ms 的反射声称为“回声”，它对声音的辨析有妨碍作用。

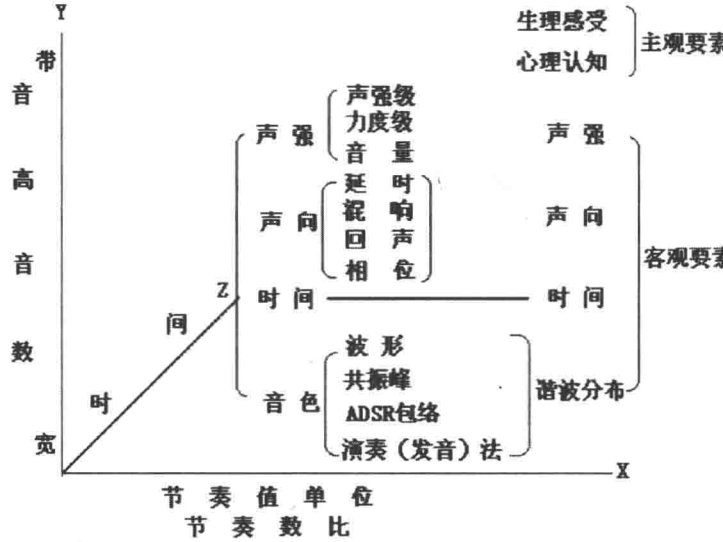
延时（Delay）：是指反射声与直达声的时间差，一般在 10ms～2s 范围以内，人们对短于 10ms 的音没有记忆，它可以多重延时制作环境效果。

相位（Phase）：这里的相位不是指波形传播中的振幅矢量概念，而是指剧场、乐队舞台安排、音箱布局等声场（声音环境）中的宏观声相问题。

综上所述，音乐的三维参数的建立实际上是一个非常复杂的工程。传统的音乐分析与创作已经习惯于在二维层面上进行。尽管历史上也有不同流派的作曲家，涉足上面提到的某些深度信息，比如勋伯格提出的音色旋律，梅西安看到的和弦色彩，布列兹的全面序列，等等，但我们必须承认，这些深度信息还只是建立在音乐的技术和艺术观的层面，还没有进入到声音的本质之中。提倡把音乐的创作引入到声音本质的观念，是法国频谱乐派发起的运动。他们成为了世界上“第一个”完全致力于研究声音本体的质地，根据泛音原理、频谱图表等手段来进行创作的作曲家实体。这也是他们对世界音乐的主要贡献，是其存在的价值所在！上面建立的三维音乐参数已经尽量剔除掉了音乐的外在形式，不用主观的认识经验，不用语文词汇的点缀。而使用一种“干”的数、理、声、电的参数，就是为了更加客观、公正、科学地去研究构成音乐的结构力因素。相信这种方法是可行的、可操作的。

必须说明的是，三维音乐参数分析法，最适合的分析对象是那些非常规手法，复杂结构的现代音乐作品。尽管它也能用来分析传统技术创作的作品，但因为这些技术手法的普遍性、已经为人们广泛地接受了。因而无须兴师动众，去简就繁地动用三维音乐参数分析，这就好比“大炮打蚊子”浪费了财力、物力、人力，效果还不好；如果使用三维音乐参数去分

析传统作品，建议只用它的原理，无须在 X/Y 轴上用尽数比参数，这反倒把简单问题复杂化了，倒是看不见的 Z 轴（深度轴）应该多花费一些气力，去揭示它所隐藏的秘密。下面把本章中提到的三维音乐基本参数及它衍生的子体参数做一个图形总结：



注释：

① Computer Graphics，简称 CG，是一种使用数学算法将二维或三维图形转化为计算机显示器的栅格形式的科学。

② 对一个周期为 T 的连续正弦波，其时域表达式及其傅立叶变换式为：

$\sin\omega_0 t \leftrightarrow j\pi\left[\delta(\omega+\omega_0)-\delta(\omega-\omega_0)\right]$，其中 $\omega_0=\frac{2\pi}{T}$。由傅氏变换式可见，正弦波只有单一谱线。

③ 对于周期为 T 的连续三角波，可用时域表达式表示为：

$f(t)=\frac{4t}{T}\cdot P_{T/2}(t)*\delta_T(t)$

进行傅立叶变换，可得对应的傅氏级数为

$F_n=\frac{-8j}{(n\pi)^2}\cdot\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$

由傅氏级数可见，周期三角波的频谱与方波类似，仅有奇次谐波分量，谐波幅度也随谐波次数的增加而递减。但三角波的谐波幅度收敛更快，因为幅度值与谐波次数的平方成反比。

④ 对于一个周期为 T、高为 1 的连续方波，可用时域表达式表示为：

$$f(t)=\sum_{k=-\infty}^{\infty} P_{T/2}(t-kT)$$

进行傅立叶变换，可得对应的傅氏级数为：

$$F_n=\frac{1}{2}\cdot Sa\left(\frac{n\pi}{2}\right)=\frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)}{n\pi}$$

考虑正频部分：当 $n=0$ 时，$F_n=1/2$；$n=1$ 时，$F_n=1/\pi$；$n=2$ 时，$F_n=0$；$n=3$ 时，$F_n=-1/3\pi$；$n=4$ 时，$F_n=0$；$n=5$ 时，$F_n=1/5\pi$……

由傅氏级数可见，方波仅有奇次谐波分量，偶数谐波均为 0。基波幅度最大，其余奇次谐波的幅度随谐波次数的增加而递减。

⑤ 进行傅立叶变换，可得对应的傅氏级数为

$$f(t)=0+2\left[\sin\Omega t-\frac{1}{2}\sin 2\Omega t+\frac{1}{3}\sin 3\Omega t-\Lambda\right]$$

⑥ 脉冲波进行傅立叶转换为

$$F(j\omega)=E\tau\frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega\tau/2}$$

⑦ 黄宇：《电子音乐与计算机音乐基础理论》，华文出版社 2005 年版。

⑧ 上述影响音色因素的划分参考了沈叶的硕士学位论文《音色分析的前提与分析模型的建立》相关内容，上海音乐学院图书馆，学校代码：10278，学号：M01－12。

第四章 频谱音乐的音高素材

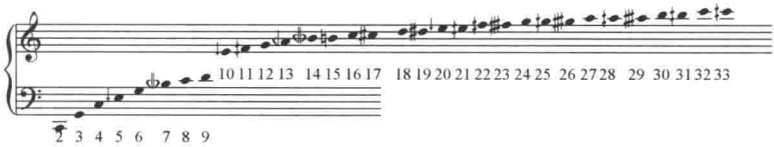
作曲，音高素材是第一因素。已有的音乐流派无不遵循这一准则，像音阶、调式、集合、序列甚至音程都是音高素材（或者叫音高素材的变体称谓）。频谱音乐也不例外，必须要先有音高素材，才可能去组织作品的纵横结构。组成音阶、调式的逻辑依据是调性；组成集合的逻辑是音程含量；序列的设定逻辑是打破调性。掌握了它们的逻辑规律后也可以反逻辑运用。那么组成频谱音乐的第一要素音高素材的逻辑是什么呢？只有这个组织逻辑具有了唯一性、创新性和排它性，才可能创造出独立的、有别于任何一种已有音乐流派的新型音乐。这也正是频谱音乐得已存在、为人认可的根本原因。本章就把研究重点转入揭密这藏于谱后的组织逻辑上，音高素材自然成为了问题的切入口。

众所周知，乐音是复合音，泛音是单一频率的正弦波分音序列。而每一种乐器的复合波都不同（参见波形状态与谐波分布及附录四《交响乐器频谱图》），只不过它们都可以通过傅立叶转化分离成若干单一的正弦波。由于非正弦周期性的三角波、方波、锯齿波、脉冲波的存在使得乐音的合成具有一些特殊性，同时也具有一定的普遍性。事实上，它们是音色造型的关键因素，电子乐器合成声音正是利用不同波形发生器的缘故，通过它们来还原、创新声音。对这种声音本源性质的探索，使得频谱音乐作曲家找到了音高素材的组织原则，其最重要的观念就是回到声音的本质，按照频谱、波形所揭示的特征去组织音高素材。面对整个谐波系列，根据波形和共振峰分布参数去组织音高材料。它的提炼方法包含两个方面，其一是自然频谱属性，原始泛音分布自成音高素材，它主要体现在声音的分析和还原过程，是自然规律的呈现；其二是用人为的手段去改变频谱的离散分布，使得泛音的呈现为我所用，进而达到雕琢声音的目的，它主要体现在声音的创新过程，是人类智慧能动性的呈现。无论是自然规律，还是人为属性，使用的关键手段就是波形特征，倘若声音完全以自身的波形来呈现，它反映的就是自然属性；如果用人为手段去改变波形呈现，即采用滤波器来适时调节波形的呈现，它反映的就是人为可动属性。下面就以钢琴最低音 C_2 的前 33 号倍音序数为基础，对照性地研究不同的波形，它们的音高素材将怎样体现。

4.1 正弦波、锯齿波音高数列

由于正弦波与锯齿波都含有所有奇、偶数的谐波，基本与理论泛音的呈现一样，仅从音高的角度看，理论泛音就是它们的音高数列。

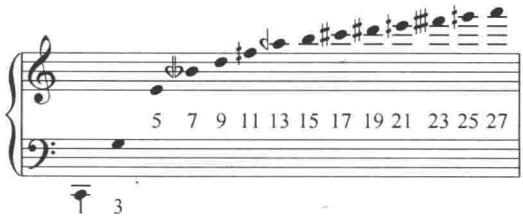
例 33：正弦、锯齿波音高数列



正弦、锯齿波音高数列的自然属性以完整泛音体现，倘若波形改变，音高数列也会改变。

4.2 方波、三角波音高数列

例 34：方波、三角波音高数列（为了便于记谱谱例移高了一个八度）



由于方波与三角波都只存在奇数泛音，过滤掉偶数泛音得到上面音高数列。

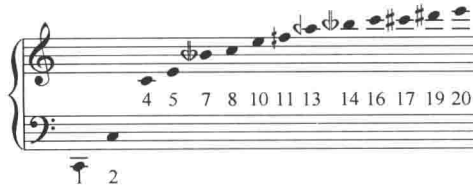
4.3 脉冲波音高数列

脉冲波比较复杂一点，它要根据占空因数的数比关系来确定谐波的丢失状况。

(1) 占空因数 1∶3

三与三的倍数谐波全部丢失，得到下列音高数列。

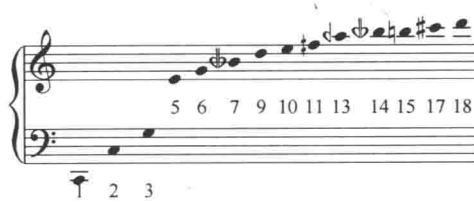
例 35：1∶3 的脉冲音高数列（谱例移高一个八度）



(2) 占空因数 1∶4

四与四的倍数谐波全部丢失，得到下列音高数列。

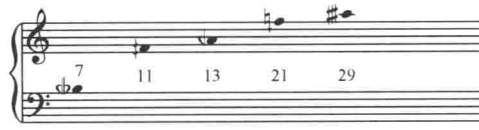
例 36：1∶4 的脉冲音高数列（谱例移高一个八度）



4.4 共振峰音高数列

上面的音高数列是针对特种波形为特征分类构成。相对于乐器为对象的研究，上述结论更加接近声音的本质。但共振峰音高数列却必须依靠单个乐器的个体来进行分析。也就是说，不同的乐器具有不同的共振峰区间与峰值。谈到共振峰必须要限定是什么乐器的共振峰值。下面参考例 18 的钢琴前五十号振幅数据，提取 2—33 序数之间的共振峰音高数列如下：

例 37：钢琴 C_1 在前 33 个倍音区间的共振峰音高数列



以上共振峰音高数列可以成为作品纵横组织的基础。T. 缪哈耶把它称为“第一集合”。

4.5 人工可变音高数列

前面 4.1—4.4 节的内容仍然属于声音的本质属性，但如果要去雕刻声音，使它能为我所用，仅仅是按部就班地使用声音的本质属性是显然不够的，还要可动、能动地创造，开发运用声音的属性。这一节就是研究采用

滤波器来改变声音原有的谐波系列、频率分布等原始因素，进而达到改变声音原有的生态属性，使其按照人为目的，在不同的频谱区域得到提升、压缩、衰减、过滤，根据选择意图去组合频率的集合（和弦），最终达到雕刻声音之目的。

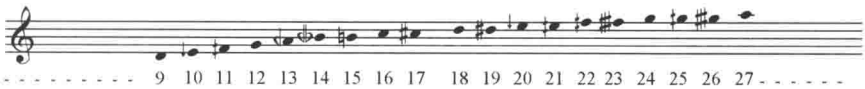
滤波器[①]（filters）就是用来衰减或提升某个特殊区域的频率，以达到改变波形、控制音色的目的。滤波器里最重要的两个控制参数就是截止频率（cutoff frequency）和共鸣（resonance，有时也称为 Q 值）。截止频率决定着滤波器开始生效的频率，共鸣会提升截止频率点附近的频率。随着共鸣的增加，提升区域会变得越来越窄，滤波器是人工改变声音属性的重要手段。滤波器根据不同的目的可分为低通、高通、带通、陷波几种类型，详细论述参见注[①]。

要注意的是所有的这些滤波器都会将波形里面的谐波滤掉。所以滤波的过程又被称为“减法合成”，通过滤波的人为手法，可以把原始频谱改变成不同目的的残缺频谱。

比如，低通滤波器将切除高频并使低频通过，在切除了高频之后声音会变得低沉。反之，则是高通滤波器做的事情。切除低频和高频，只让中间的频率通过，就是带通滤波器的任务。滤掉中间某个区域，让高频、低频通过，则是陷波滤波器来完成。除此以外，还可以采用不同的波形（正弦波、三角波、方波、锯齿波、脉冲波）滤波器以及由它们联合矩阵构成的滤波器来改变频谱的离散分布，做各种各样的处理，达到人们意想不到的复杂滤波结果。

下面仅以带通滤波器（band pass filter）为例，在 290—880Hz 的频率范围内，对钢琴 C_1 的泛音系列进行滤波处理，那么低于 290Hz 和高于 880Hz 的泛音及基音全部都会被过滤掉，在不考虑波形干涉的情况下，290—880Hz 频率范围内的泛音都可以出现，参见例 38。

例 38：带通滤波器在 290—880Hz 频率范围内对钢琴 C_1 理论泛音滤波



bound＝290－880Hz

通过上例的说明，我们了解了带通滤波器的作用，其余的滤波器原理一样，不再细说。事实上，滤波器通常不是孤立使用，而是几组联合使用。又由于它们还与波形控制紧密相连，所以最终实现的频谱离散、声像呈现可以说是随心所欲，变幻无穷，这也是频谱音乐雕刻声音的主要技术手段。

综上所述，波形呈现和滤波器的使用成为频谱音乐音高素材的逻辑依据。

另外，频谱音乐的音高素材除了广泛使用乐音，还大量开发利用噪音，各种类型的噪音细部精确地划分与运用已经成为其流派的本质特征。

4.6 噪音

从客观物理现象看，噪音与乐音相比，乐音含有确定的音高，有突出的谐和频谱，而噪音包含有理论上无限、持续的频率分布。波形不是规律的周期循环，振幅是任意无规律的波动起伏。而从主观上看，噪声泛指听者主观不需要的一切声音。但凡对人来说不需要的声音，哪怕是曾经喜欢的乐音，都可能被视为噪音。当然对噪音的界定，往往主、客观两者有着紧密的联系。从声音合成的角度看，噪音有着丰富的频谱内容。这就为计算机合成、加工提供了理想的材料，这尤其表现在后面介绍的减法合成中。因此，对于计算机（频谱）音乐来说，噪音是音响合成至关重要的声音资源。以下有必要对噪音再做一个详细界定。

噪音（noise）：最早的认识成果出现于语言学中，时间难以推定，时至今日，已经具有多层含义，最重要的有以下几种解释：

（1）干扰声（Unwanted sound）：可以追溯到 1225 年，甚至更早时期，被认为是一种无用的声音。（参见 The Oxford English Dictionary）

（2）非音乐的声音（Unmusical sound）：19 世纪德国物理学家赫尔曼在研究非周期振动时使用了噪音概念，相对于周期振动的音乐声音。

（3）所有嘈杂音（Any loud sound）：对听觉、环境造成损害的高能量、混杂声。

（4）通信系统的干扰音（Disturbance in any Communication system）：电磁、静电、失真对信号的干扰。

噪音分类：

A. 宽带噪音（Broan band noise）：又称“多频段噪音”，表示噪音的声能分布宽，覆盖听觉很大的范围（如雷声、喷气式飞机的发动机声）。

B. 窄带噪音（Narrow band noise）：能量分布在相对小的听觉范围的噪音（如沙沙声、嗡嗡声）。

C. 高斯噪音（Gaussian noise）：18 世纪德国物理学家高斯[2]在研究碳棒的热传递过程中，能量变化是没有直接规律的，而是一种复杂的函数关系，也被称为“布朗运动”（Robert Brown 在 1827 年研究空气中的质子运

动时发现这一规律）。后来在电子管、半导体管中广泛运用这一理论来研究振幅的变化规律。它的随机函数服从正态分布，功率谱密度恒为一个常数，是噪音的一种数学表达。

D. 背景噪音（Background noise）：当主频信号消失后由背景（环境）音组成的咝咝声。通常使用信噪比、比率等术语来描述。

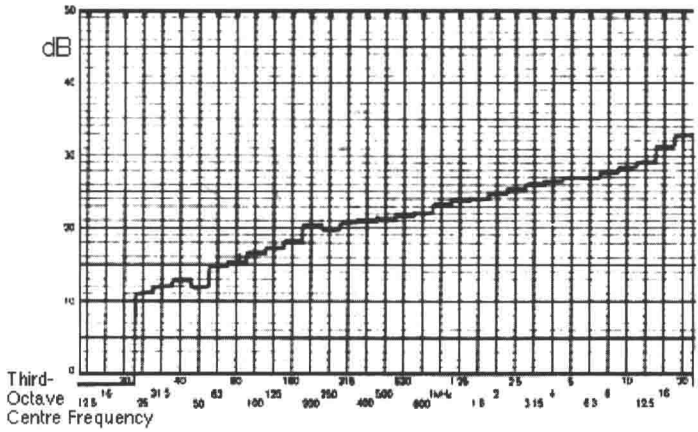
E. 随意噪音（Random noise）：没有固定的振动频率，只有随时间而变化的概率函数关系频率值。

F. 铁锈噪音（Rustie noise）：非周期性的随机脉冲，它有一定的时间间隔，在小于 0.3 ms 时，它就是白色噪音。

G. 白色噪音（White noise）：是指一种声音信号，其所有频率的振幅强度与它的频率高低相对应。就是说，高频振幅相对高，低频振幅相对低。白噪声有时也称作“白声”，《辞源》上是从光学中的“白光”（White Light）一词引申而来。白光是指同时呈现所有光谱的光学现象。纯粹的白噪声在现实物理世界中几乎是没有的，它只能通过白噪声发生器来产生。由于白噪声丰富的频谱和极大的可塑空间，它一直是计算机声音合成中非常有用的声音资源。一个频率变化在三个八度的白噪声频谱。可以看出它的特点是随着频率的增高，其振幅能量也在增长。参见例 39。

H. 粉色噪音（Pink noise）：把白色噪音过滤就得到有色（粉色）噪音，它是指各倍频音的强度是相等的。粉色噪音的频谱频率加大振幅不变。

例 39：三个八度的白色噪音频谱图③

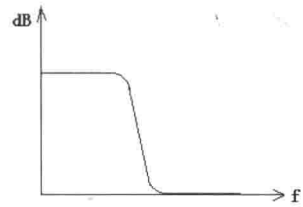


注释：

① 滤波器可以分下列几种：

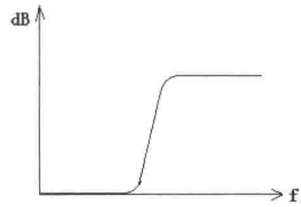
低通滤波器（low pass filter）：顾名思义，低通滤波器将切除高频并使低频通过，而开始滤波的点（也就是截止频率点）是可以通过截止频率来调整的。在切除了高频之后声音会变得低沉。参见下图。

低通滤波器



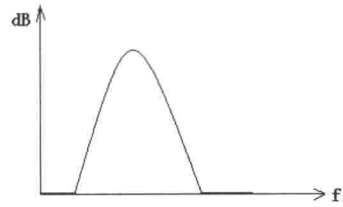
高通滤波器（high pass filter）就是做与低通滤波器相反的事情。只是在实际应用中高通滤波器不很常用。参见下图。

高通滤波器



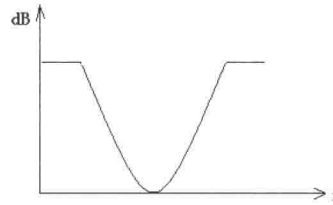
带通滤波器（band pass filter）就是切除低频和高频，只让中间的频率通过，你可以看作是我们将低通和高通两种滤波器同时应用的结果。参见下图。

带通滤波器



陷波滤波器（band reject filter 或称 notch filter），滤掉某个区域，让高低频通过，与带通滤波器相反。参见下图。

陷波滤波器



如果你在使用低通滤波器时将截止频率调得非常小，那么就没有声音可以通过了，在高通滤波器使用很高的截止频率也是一样。要注意的是所有的这些滤波器都会将波形里面的谐波滤掉。滤波器是人工改变声音属性的重要手段。

② Karl Friedrich Gauss，1777—1855，德国数学家、物理学家。

③ 参考巴里·爵阿克斯《声音生态学手册》，Barry Truax's HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY。

第五章 频谱音乐的声音合成原理

“声音的合成”本身是借用的一个电子音乐的术语，但它的外延和内涵都不仅限于电子音乐，而且囊括一切音乐形式，甚至还泛指了“一切声音艺术”的领域。它没有时间界限（古代、现在、未来都能实用），没有“固定的范式”划分（或者说已经打破了传统的音乐界限）；一切能成为“艺术的声音”，甚而言之，只要在同一场中存在两个（或两个以上）的声音都存在“合成”的问题。比如相长干涉、相消干涉、拍频都是声音的合成现象，只不过这些现象主要属于声音合成的“副作用”；声音合成的积极意义主要是通过声音的还原与创新来实现的，使用的技术手法主要有原形合成与变形合成两大类。

法国音乐一直在力求摆脱德国（主流）音乐的影响，走自己的路，从雅内坎（Janequin）到马肖（Machaut），到梅西安（Messaien），再到布列兹（Boulez），法国音乐家始终在探寻一条属于自己的，不受约束的康庄大道。频谱音乐作曲家接过了前辈的旗帜，背离世界音乐发展的主流（以人为预制为先的作曲流派，20 世纪后半叶盛行的全面序列音乐、集合作曲），另辟蹊径开拓出一条“声本体”的新途径，即完全致力于研究声音本体的质地，根据泛音原理、频谱图表等手段来进行创作。由于对声音的态度的不同，对声音“形式”与“本质”的考虑先后顺序的不同，使得频谱音乐创作出有别于主流的、属于自己的新语境。他们不断地提问：什么是声音？它是如何表述的？如何用精确的语言来解释声音是怎么被听众接收的？我们能够开拓音乐领域的声音吗？我们能够说声音这种物质在人们心理层面是如何表达的吗？我们怎样去思考音乐？音乐的基本面貌是什么？用一句简单的话来回答：按照声音的本质属性去组合声音。

提斯坦·缪哈耶认为：

> 我经常使用一个术语“集合”胜过“和弦”；另外，我经常说“熔合”。因为在合成电子音乐中，每一个音结合，所属的地位是相等的（不像和弦有根音、三音、五音……主次之分）。在乐器写作中也同样处理。电子乐器的音，非常的纯，类似正弦声音，每一个音都很强。于是集合里的音就不像一个和弦里的音，而是像一个单独的，可

察觉的物体，一种音色。另一个方面，管弦乐器的音却很丰富（每个乐器产生的音都有很多泛音，有复杂的包络，有颤音等等），更像通常称谓的“协和”，当电子声音与乐器声音同时听到时，更精确的描述可以用一个合成词“调和音色”。[①]

提斯坦·缪哈耶把频谱音乐的音高素材看成是集合，这个集合不是古典意义的和弦概念，这点尤为重要。同时这个集合也不同于阿伦·佛特说的集合，阿氏发明的集合理论，运用了子集、补集、交集等理论。

既然以某一个乐音为基音，测出它的众多泛音（分音），那么这些泛音（分音）更接近于纯音，所以在使用它们时应该重视它们的纯音意义，即上述的集合意义。但是任何一件常规乐器演奏了集合中的某个音（分音），它都被赋予了音色和该乐器丰富的谐波，因而它又变成了乐音。所以通过交响乐器的配器分置，去呈示缪哈耶认为的集合音高，其结果，不是去还原被测基音乐器的音响，而是去创造了一种新的音响，只不过这个音响是以被测乐器的频谱特征为蓝本。

提斯坦·缪哈耶还认为：

集合是一种更加复杂的单位，这种单位的频率分析仅仅依靠耳朵是非常困难的。根据它们的关系，可以转化成不可分割的块状整体（这种感觉与电子音乐的环形调制有点相似），这带给我们一种协和音色的想法，每一个协和音色都是由一个频率占主导而组织起来的，它的强度，数字位置是有序的……

它将是一个能量组织系统，或者是乐音通向噪音的途径，从光滑的频率到粗糙的频率，从周期运动到非周期任意律动等等。音乐的曲式不再由武断的规则、死板的结构及它们体现的物理论来组织。在曲式和音乐素材方面，旧的容器和内容及它们的对位法则都将失去意义。作曲的过程将变成一个合成的艺术（体验），出现一个连续的运动，从不同到融合。[②]

5.1 原形合成

原形合成（Original Synthesis）又称为“线性合成”（Linear Synthesis），就是直接利用泛音，或者是从泛音之中，按照一定的谐波规律（波形分布、共振峰组合、滤波器过滤等规律）得到的音高素材的直接运用，

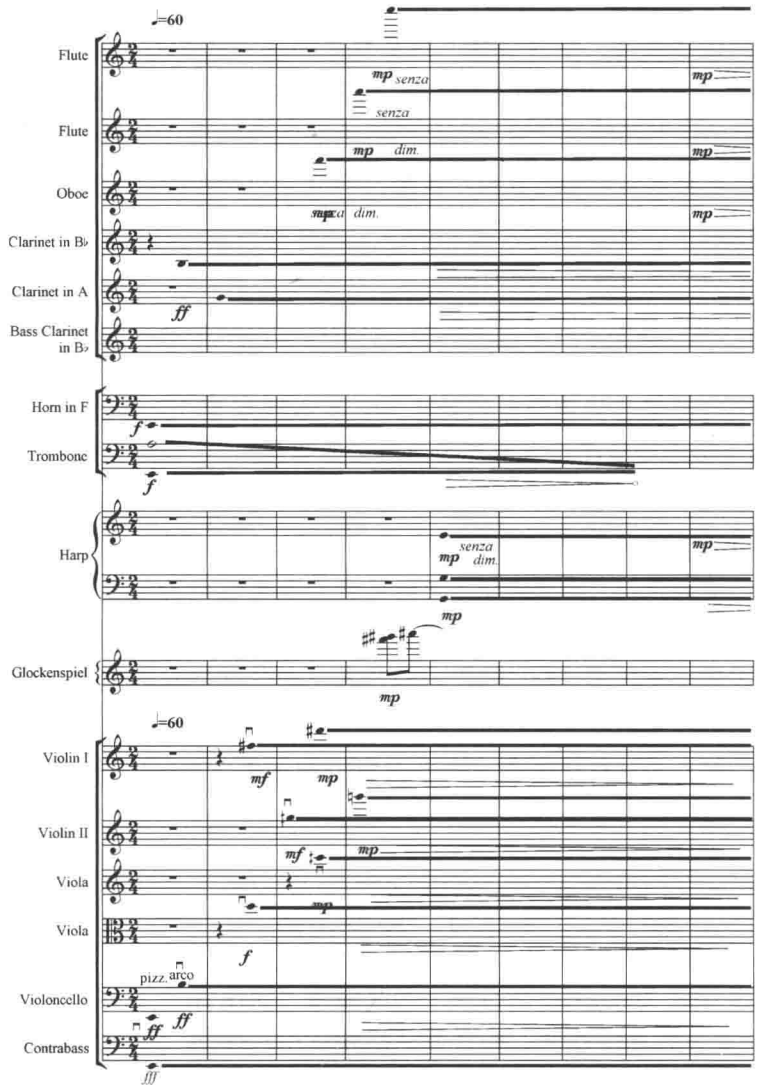
称为“原形合成”。这种合成相对于变形合成要简单、易行、协和一些。

一、加法合成（Additive Synthesis）

加法合成的本质：根据傅立叶分析，任何的声音都可以分解成无数多个正弦波。反之，把不同谐波的频率和振幅，将它们混合在一起组成一个新的声音，叫做“加法合成”。

杰勒德·格瑞瑟在 1975 年创造的《分音》[3] 中就采用了这个技术，作品开始就利用奇数泛音来合成方波。参见例 40。

例 40：杰勒德·格瑞瑟的作品《分音》总谱第 1 页



这种技术最强调的因素是基音的作用，如谱例中对 E 音的强调，而后就是奇数谐波音的依次相加。低音提琴是基音，大提琴拉奏为 3 号泛音，第二中提琴 7 号泛音，第一中提琴 13 号泛音，第二小提琴分别演奏 11 号与 19 号泛音，第一小提琴分别演奏 9 号与 15 号泛音（完整的泛音列参见例 107《E_1 的前三十二号泛音表》）……这里运用的是方波原理，由于用真实乐器的乐音来代替泛音列中的泛音进行，最后得到的音响要比方波音响复杂得多。也就是上面说的，还原声音不是目的，创造声音才是根本！论文中所有音高素材的运用都存在这个问题，下面不再重复表述。但有一点需要特别强调，就是泛音列中的音高序数具体分配给什么乐器？对此，非常有讲究。看了频谱离散图我们都会知道，一般情况下，低频泛音最早出现，最后消失；高频泛音最晚出现，最先消失。声音是根据 ADRS 包络来发展的。这就要求在乐器分配的过程中，充分地遵循这一原则。可见杰勒德·格瑞瑟的《分音》正好体现了这个原则，从这个意义上看，《分音》的开始部分还是在“还原声音”（还原方波）。如果反其道而行之，那就是在创造一种新的音响了。这还引出一个问题：如果以电子设备（合成器、电脑）的“纯正弦音”作为上述泛音列的谐波分量，来合成方波音响；同时又以常规管弦乐器来合成同一个泛音列，它们的音响之间如何平衡？如何融合？可以肯定的是它们的音响会出现偏移。

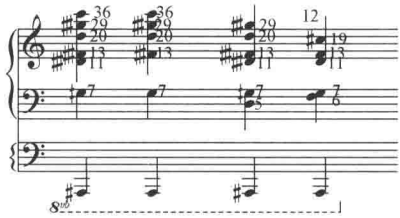
加法合成有一个缺点：不能合成带气息、擦弦、敲击的音头噪音。

二、共振峰合成（Formant Synthesis）

共振峰合成的原理：就是利用共振峰区间的相对共振峰值泛音来合成声音。

例如，提斯坦·缪哈耶在 1983 年创作的《瓦解》[4] 开始部分，以钢琴升 A_2 为基音构造出下列共振峰和弦。

例 41：以钢琴升 A_2 为基音的共振峰和弦



原始音高数列参看第四章《频谱音乐的音高素材》之 4.4《共振峰音高数列》。

所谓原形运用就是按照波形或共振峰取得的音高素材，遵循其数列顺序依次使用。

三、减法合成（Subtractive Synthesis）

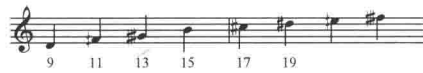
减法合成原理：所谓减法合成就是“雕刻声音”，从复杂声音（厚波）中减弱或移除掉不需要的谐波，以创造新的声音。由于减法合成是通过滤波器来实现的，因而它又称为滤波器合成。（物理原理论述参见附录一减法合成内容）

下面我们再来看用方波滤波器来过滤钢琴基音 C_1 的谐波分布，会得到什么样的结果。

取频率范围：290－760Hz

C_1 的完整泛音表请参见第二章《泛音的作用》之 2.2 理论泛音内容介绍。

例 42：方波滤波钢琴 C_1 泛音列

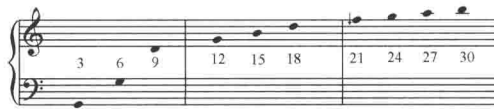


bound＝290－760Hz

可见所有的偶数泛音全部消失，这就是方波过滤的结果。

如果把钢琴 C_1 的谐波系列通过另外的滤波器过滤，又会得到不同的音列结果。下面是通过梳通滤波器，设 3 与 3 的倍数通过（也可以设计成一个不规则的选择模式）。

例 43：梳通滤波器的协和频谱



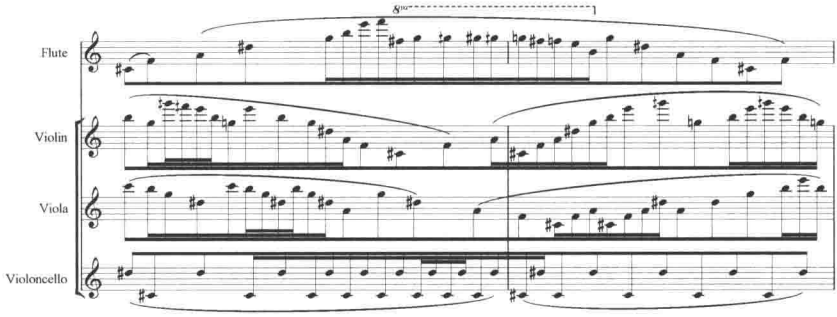
every 3rd starting on 3

可见无论什么种类的滤波器，其本质的目的就是“减去”不需要的谐波分量，让“声音雕塑”朝着人为意象所期待的方向发展。

上述的讨论是从音高的角度来看滤波器，如果从波形的频谱呈现来看滤波器，我们还可以得到不同的织体。因为不同的滤波器产生出不同的波形，这些波形在相位、振幅值、频率值上都有差异，如果把这些滤波后的“波形”有组织地“编制”起来，就会得到不同类型的波形频谱图。下面就是作曲家提斯坦·缪哈耶于 1978 年在室内乐作品《太空》（*Ethers*）中通过波形频谱图直接转化的织体结构。这种通过频谱图“翻译”而来的织

体结构会产生众多人们意想不到的音响图画。

例 44：提斯坦·缪哈耶在室内乐作品《太空》（*Ethers*）[5] 中协和结构的内部运动



（Paris：Editions Transatlantiques）

作曲家把这种手法称为“频率扫描”（frequency scan）[6]，即完全根据泛音分量的波形、频率及时间过渡性来进行实时翻译的创作方法。

通过以上的介绍我们可以了解频谱音乐很好地运用了现代“科学成果”，使得“科学与艺术”得到了前所未有的“高度融合”，这同时也给我们留下了许多有益的启发，值得我们去深思和借鉴。频谱音乐是强调“声本体”的音乐流派，透视、解析声音，揭示声音的本质是这种音乐流派的根本所在。

5.2 变形合成

变形合成（Distortion Synthesis）又称为“非线性合成”（Nonlinear Synthesis），其具体技术包括声音调制技术、非线性波塑形（Nonlinear Waveshaping）和离散加法公式（Discrete Summation Formulas）等技术。

所谓声音调制（Modulation）就是通过一个声音信号的振幅、频率和相位来修饰（调制）另一个声音信号的振幅、频率和相位。被调制信号称作“载波体”（或者叫做“载波器”，Carrier），调制信号叫做“调制体”（或者叫做“调制器”，Modulation）。

也就是说，原形合成是使用已知的音高数列去“穷尽其排列组合的可能”，构成音乐发展的逻辑动力。

而变形合成是只使用一对原始音（一个音程），把一个音作为载波，另一个音作为调制波生成，繁殖出一系列的子音、孙音、重孙音……而这

些音多为扭曲、失真、变形的非线性音，所以它们的不协和性加强，对应的频谱为不协和频谱。

是使用已知的音高数列，还是使用一个音程去生成未知的音高矩阵是原形与变形合成的根本区别。

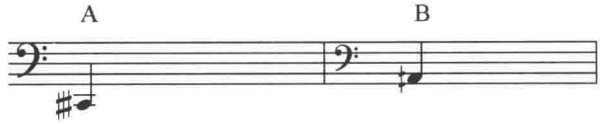
下面先来研究振幅调制在频谱音乐中的运用。

1. 振幅调制（AM）

振幅调制（Amplitude Modulation）就是通过一个声音信号的振幅来修饰另一个声音信号的振幅，简称 AM。振幅调制同样包括两个方面：载波体（Carrier）与调制体（Modulator），载波体提供了整个系统运作的基本频率，调制体本身则以另一种频谱内容与载波体相互作用。（物理原理论述参见附录一《振幅调制原理》）

提斯坦·缪哈耶在作品《瓦解》（*Disintegrations*）中使用了这种技术，在作品第 IX 部分的弦乐器的频谱调制中，他设定了一对音程（升 3/4C—升 1/4A）作为基础，如下图所示，其中 A、B 两字母代表两音高。

例 45：提斯坦·缪哈耶在作品《瓦解》第 IX 部分使用的一个音程（作为声音生成器）



而后分别以 A、2A、3A、4A、5A 为载波，以 B、2B、3B 为调制波，根据旁频公式：

$W_{sb}=W_c \pm W_m$

得到：

A+B，A−B，A+2B，A−2B，A+3B，A−3B，

2A+B，2A−B，2A+2B，2A−2B，2A+3B，2A−3B，

3A+B，3A−B，3A+2B，3A−2B，3A+3B，3A−3B

4A+B，4A−B，4A+2B，4A−2B，4A+3B，4A−3B

5A+B，5A−B，5A+2B，5A−2B，5A+3B，5A−3B

上面的图示告诉我们，当载波频率固定的情况下，可以得到六个不同的调制波（横向关系），当调制频率固定的时候，可以得到五个不同频率的调制波（纵向关系）。共三十个频率音高，根据理论推理 A=71.36Hz，B=113.25Hz，把上方三十个音高换成频率得到下表：

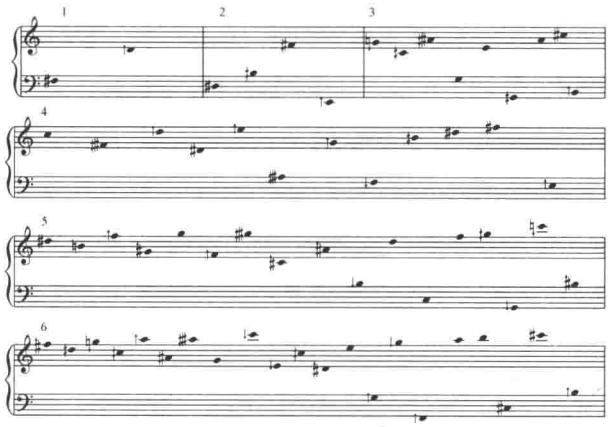
例 46：振幅调制频率表

单位：Hz

184.61	−41.89	297.86	−155.14	411.11	−268.39
255.97	29.47	369.22	−83.78	482.47	−197.03
327.33	100.83	440.58	−12.42	553.83	−125.67
398.69	172.19	511.94	58.94	625.19	−54.31
470.05	243.55	583.30	130.30	696.55	17.05

表中的负（一）值表示相位差，调制的结果构成下例：

例 47：缪哈耶在《瓦解》第 IX 部分调制生成的矩阵



图中矩阵作曲家根据协和等级进行了分组，其中文中表格计算统计特别低的音已经省略。

2. 环形调制（Ring Modulation）

环形调制是振幅调制的一个特殊情况，当调制技术直接作用于载波器的振幅输入时，这种调制称为环形调制。（物理论述参见附录一中的环形调制内容）

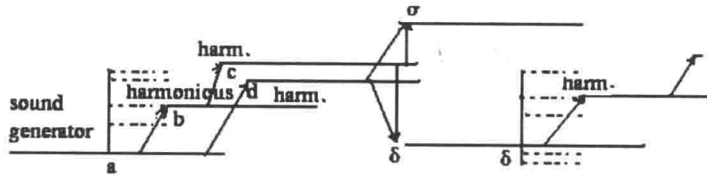
缪哈耶说：

> 环形调整是种老的技术，斯托克豪申在管弦乐作品《混合》（Mixtur）和为两架钢琴和电子乐所写的作品《曼陀罗》（Mantra）中使用了这种技术，斯氏非常清楚在环形调制中利用（两个）载波频率间的不同间距，可以产生协和、不协和的不同效果。并把它转化为音符在钢琴上演奏，他没有精确地计算各自音高。更重要的是，他没有重视他的这个音高系统……理论音高。于是，在这部作品中存在相抵触的声音。
>
> 这种技术创造了新的频谱，这种模式可以发生在混合音乐领域，

甚至在纯器乐作品中。在杰勒德·格瑞瑟（*Gerard Grisey*）1975 年创造的《分音》（Partiels）作品中，他虚拟地计算了长笛和单簧管的旋律线，并从计算中产生出次一级的旋律线，在弦乐队演奏的旋律就是这种计算对位的结果。[7]

参见例 48。

例 48：杰勒德·格瑞瑟的《分音》音高生成原理

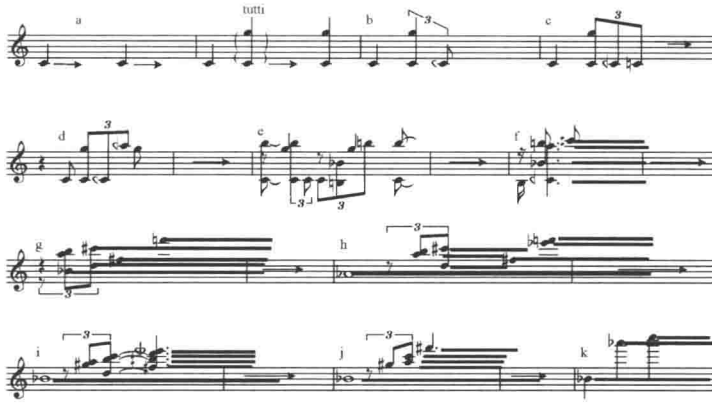


它的写作原理是：

基音 a 作为一个声音发声器产生了谐波 b、d；谐波 b 创造了它自己的谐波 c，谐波 c 与 d 产生干涉作用，相消干涉产生它们的差音 δ（旁频），相长干涉产生它们的和音 σ（旁频）；δ 再成为下一个声音发生器……这个过程一直持续下去。声音发生器（自我繁殖）产生自己的和声（经过媒介的传播声音的音色逐步分解）。[8]

提斯坦·缪哈耶在多部作品中使用了这种技术，比如《瓦解》（*Disintegrations*）的第二和第九部分，《忆/蚀》（*Memoire/Erosion*）的第一部分。参见例 49。

例 49：缪哈耶在《忆/蚀》[9]的开始使用发生器原理生成系列组织音高



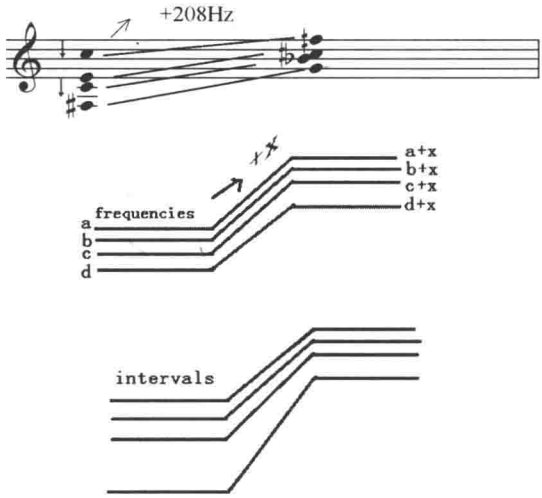
整个协和结构都来自铜管的第一个音 C，弦乐接管过去，逐渐从

正常位置向琴马靠拢演奏 C 音，在全奏处和弦拉紧，当 C 音轻微下降时，好像一个转盘慢慢滑下（b）。这种飘逸、萌芽的状态到（$c-d-f$）得到了加强。C 的和声意义减弱了，最终消失。伴随着它的音色拓片和旋律线条的扭曲，它的频谱也逐渐扭曲（$g-h-i$）。bb 在合成频谱中得到了巩固……在循环中是熟悉的现象（j）——最终保持不变。声音的分音在它的高频部分被结合了起来（伴奏）。请注意：这个简略的分析是必要的，尽管它不完善、对作品的协和控制也是有限的，而且它忽略了协和相互依存的关系，忽略了对节奏和音色的说明。[10]

事实上（作品里面运用的）是一种仿真调制，环形调制是促使频率移位。通过这种技术一个新的频率可以通过加减法从复杂的声音中产生出来，它产生一种线性的频率变化，同时创造一种非线性的音程变化。

例如在缪哈耶的管弦乐作品《空间激流》的结束部，作曲家使用了下面一个“第一集合和弦”（升 f、低八分之一音的 c^1、e^1 和低八分之一音的 c^2），而后让它们同时加上 208Hz 的频率，得到后面的音高和弦。这个和弦从频率上看是前一个和弦加一个固定频率 X（频率是线性变化），得到的后一个和弦结构从谱例音程上看却完全变了（这就是种非线性特征）。

例 50：缪哈耶在《空间激流》[11]的结束部分应用的频率移动



和弦旋幅带宽从低音区向高音区发展，按照非线性收束方式变瘦（窄）。可见谱面音程间距的均等并不等于频率间距的均等，这是两个完全不同的概念。

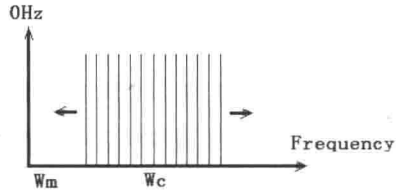
3. 频率调制（FM）

频率调制（frequency modulation）：将不同的数据信息调制成相同幅度但不同频率的载波信号，由于振幅是保持恒定，频率调制是一个低噪音的进程，并提供了一个高质量、高保真的调制技术。它可以用下列公式表示：

$$W_{sb}=W_c\pm n.\ W_m$$

W_{sb}是频率调制产生的边带频率，实际上 W_{sb}是一系列的数，因为 n 可以取任意的整数（0、1、2、3、4……）。每个边带平均分布在 W_c（载波器频率）的两侧，分别是 W_m（调制器频率）的任意整数倍。可以看到是调制器决定了边界的产生位置。理论上说 n 可以取无限的整数，也就是当调制器对一个载波器进行调制时会产生无穷级数的边带，但是在实际应用中不可能有能够产生无穷级数的设备，所以边带的值都被制造商限制在他们认为有意义的数里面了。下例形象地表示了边带的发生。

例 51：频率调制边带（旁频）的位置

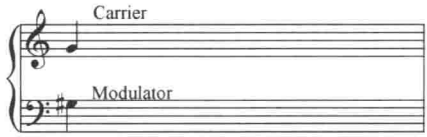


上例的边带向高频发展是按照 C＋M、C＋2M、C＋3M、C＋4M……向低频发展排列的边带就是 C－M、C－2M、C－3M、C－4M……

以上介绍了调频音色、音高的算法（algorithm），也叫做“矩阵”（matrix）。下面我们来看频谱音乐作曲家是如何把它们变成具体的音符。

提斯坦·缪哈耶在 1980 年创作《龚德沃呐》（*Gondwana.*）为交响乐队而作时，第一个集合就由 FM 调频技术来生成。他规定 g^1 为载波频率，升 g 是调制频率，它们为一对不协和的音程。参见例 52。

例 52：缪哈耶在《龚德沃呐》[12]设计的一对“原始音程”

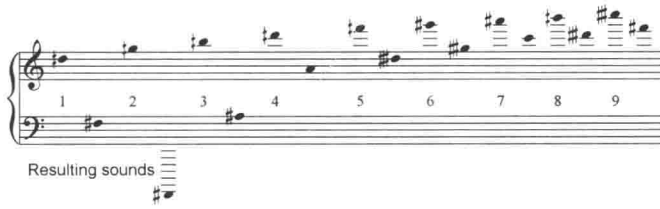


把它们分别带入旁频公式：

$W_{sb}=W_c\pm n.\ W_m$　　（n 分别取 1，2，……9）

得到下例集合。

例 53：缪哈耶在《龚德沃呐》用频率调制生成的矩阵

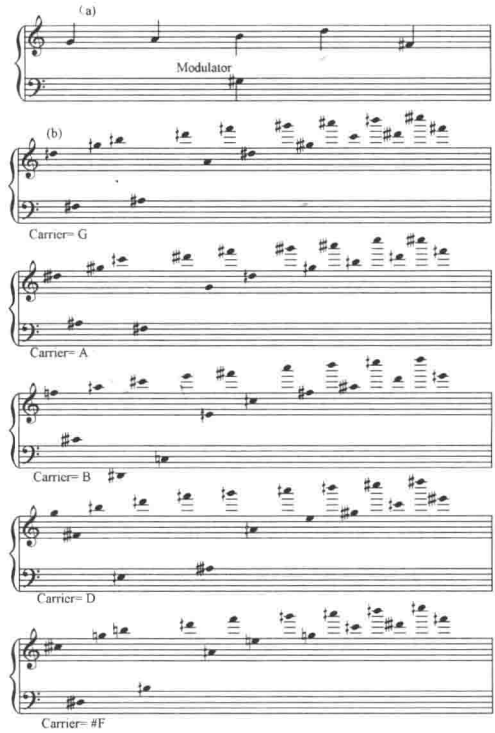


当 $nW_m > W_c$ 时，（$W_c - nW_m$）为负数，这表示相位相反，这种矩阵算法的依据是，最低频率不小于 20Hz，最高频率，理论上可以无限高，实际操作是，当加法与减法的结果（即上面谱例上行谱与下行谱的音高频率）趋于接近时，或是“重合”时（载波频率相对小到可以忽略），矩阵的上下两行不产生交叉为界。矩阵中下行谱例先向低音区发展，而后向高音区发展这个现象称为折叠效应（foldover effect）。

由于调制指数可以调整，n 可以从 0 直到∞，所以在实际操作中是以管弦乐队的总音域为极限来控制高低频率。

下面是用调整频率升 g 分别对下列音列（g^1、a^1、b^1、d^2、升 f^1）进行 FM 调整，得到各自矩阵。

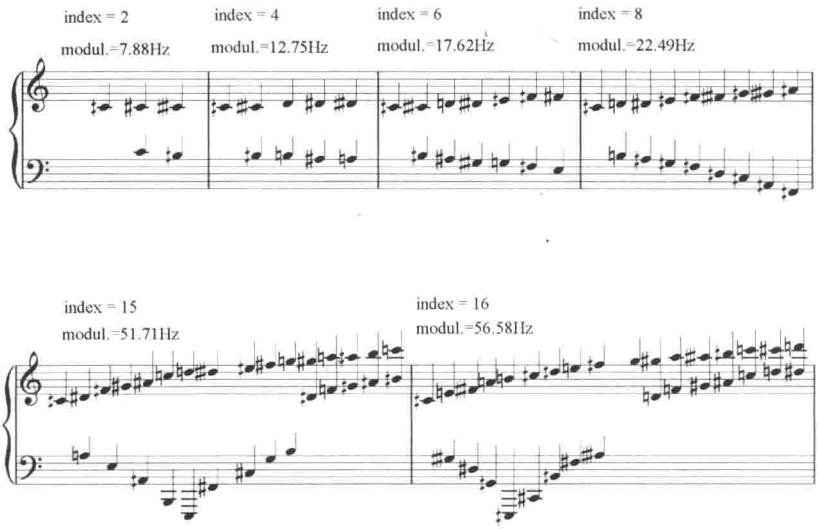
例 54：调制矩阵系列



(a) 为载波级数　(b) 为频率调制的级数矩阵

下例是《龚德沃呐》（*Gondwana*）为交响乐队而作的 F 部分，以升高 1/4 音的 c^1 作为载波，通过修改调整波的频率，同时随着调整频率的增加，依次增加输出频率的数目（谱例中的 index=n），从而形成以升高 1/4 音的 c^1 为中心的环形矩阵，就好似一石击入水中，生成一环一环的水波，随着慢慢地调制步伐的扩大，一阵阵水波向河岸荡漾。开始的波很小，逐渐扩大，直到覆盖管弦乐的整个音域。

例 55：缪哈耶在《龚德沃呐》的 F 部分频率调制系列矩阵



这种矩阵的使用通常是按照频谱离散图的规律，首先让高频分音消失，而且它们的力度也很弱，把调制频率（或者载波频率）作为最大共振峰持续最长时间。

通过频率调制得到的矩阵事实上是为我们提供了作曲第一手材料——音高数列。这种数列形式因为它们不同于传统的音阶结构，也没有调式的感觉，故而确保了以它为基础的音响结构完全不同于已有的音响，成为具有“唯一性”标识的音乐形式。

声音合成这一章主要介绍了频谱音乐的声音生成原理，事实上，这些原理并非频谱音乐所独有，而是更大范围的电子音乐，甚至应该说是电子物理学的基本原理，只不过频谱音乐很好地运用了这些“科学成果”，使得“科学与艺术”得到了前所未有的“高度融合”，同时也给我们留下了许多有益的启发，值得我们去深思和借鉴。

从声音合成角度来看，还有几种重要的合成技术（比如粒子合成、波塑型合成、物理模仿合成），频谱音乐没有涉及，但它们也已经被别的作

曲家运用，鉴于它们的重要性，本书附录里给它们一个简要的说明。详见附录一《声音合成技术》补充内容。

注释：

① 引自 Villeneuve—les—Avignon Conferences，Centre Acanthes，9—11 and 13 July 1992，Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 208.

② 引自 Tristan Murail（translated by Joshua Cody）The Revolution of Complex Sounds *Contemporary Music Review Vol*. 24，*No*. 2/3，*April/June* 2005，p. 135.

③ 《分音》为 18 位音乐家而作（1975），被认为是第一个频谱音乐作品，属于早期频谱音乐，其中音的衍生、演变多采用虚拟计算。

④ 《瓦解》（*Disintegrations*）（1982）为 17 位演奏家和电子声音而作。（commissioned by IRCAM). Paris：Editions Lemoine.

⑤ 为长笛、单簧管、小提琴、中提琴、大提琴、贝司而作 Paris：Editions Transatlantiques.

⑥ Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 128.

⑦ Tristan Murail ：Villeneuve—les—Avignon Conferences，Centre Acanthes，9—11 and 13 July 1992.

⑧ Tristan Murail ：The Revolution of Complex Sounds. Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，pp. 121—135.

⑨ 《忆/蚀》（*Memoire/ Erosion*）（1975/1976）为 10 位演奏家而作。（commissioned by the French Ministry of Culture). Paris：Editions Transatlantiques.

⑩ Tristan Murail ：The Revolution of Complex Sounds Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 129.

⑪ 《太空激流》（*Les courants de Vespace*）（1979）为合成器和小交响乐团而作（commissioned by the French Ministry of Culture). Paris：Editions Transatlantiques.

⑫ 《龚德沃呐》（*Gondwana*）（1980）为管弦乐队而作（commissioned by the town of Darmstadt).

小 结

上篇就频谱的概念及频谱图所包含的内容参数。泛音列的范围，从理论与实验两个角度对比性地研究了基音的谐波与谐波系列的线性与非线性分布情况，对于谐波与谐波失真；倍频、旁频、间谐波；共振峰、质数泛音及微分音出现的条件做了逐一研究，它为频谱音乐的结构力因素的组成奠定了基础。

本篇提出了一个重要结论：频谱音乐是以声音生态学的态度，通过频谱的测试找到第一集合因素，其中波形对于音高素材的提取具有决定性作用，滤波器是雕刻改变声音的最有效工具，而后运用声音合成技术来生成线性、非线性矩阵，以此构筑作品的纵横组织结构。

我们可以用下列图示来个逆向性的追本溯源：

非线性矩阵—线性矩阵—音程—第一集合—基音

可见真正的本质还是基音。

另外需注意：谱面音程间距的均等并不等于频率间距的均等，这是两个完全不同的概念。这对下篇将要讨论的内容具有重要意义。

缪哈耶说：

> 频谱的目的是建立在相同时间的声音和它的时间过程之上（引出曲式）。甚至于我们可以从声音里扩展出它的组织结构……（这种组织结构）将是一个能量组织系统，或者是乐音通向噪音的途径，从光滑的频率到粗糙的频率，从周期运动到非周期任意律动等等。音乐的曲式不再由武断的规则、死板的结构及它们体现的物理论来组织。在曲式和音乐素材方面，旧的容器和内容及它们的对位法则都将失去意义。作曲的过程将变成一个合成的艺术（体验）。
>
> 对传统技术（十二音序列、偶然音乐、随机音乐等等，它们的技术运用继续使用一些陈旧的参数）作出修订是必要的。[①]

由此我们不难看出频谱音乐对于传统技术的扬弃态度，对于声音本质的新的观念，对于科学性、实证性技术的崇尚。那么传统“四大件”和声、复调、曲式、配器还存在吗？实证性的音乐使得它的创作导向了声本

体，而音本体的作用是否要减弱呢？这些问题我们留待下篇继续研究。在此，借用伊恩内斯·克塞纳基斯的观念“声音的材料来源于技术，材料是从来不可能与技术分离的。因此，应该积极地拥抱各种技术”[②]来作为结语。

注释：

① Tristan Murail：The Revolution of Complex Sounds in Contemporary Music Review2005，p. 135.

② Morton Feldman and Iannis Xenakis In conversation，Edited by Vincent Gasseling and Michael Nieuwenhuizen. The present text is an edited transcription of a conversation between Morton Feldman and lannis Xenakis which took place on Friday，July 4，1986 at De Kloveniersdoelen，Middelburg，The Netherlands. The conversation was part of a five day master—class given by Morton Feldman during the Festival Nieuwe Muziek，June 19 - July 6，1986.

中篇　结构形态与原则

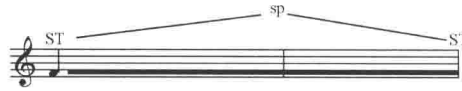
世界音乐艺术发展史告诉我们一个事实：任何一种流派的形成及其建立的理论体系，其后面都有属于自己独特的观念与语境，有新的发现和新的方法的萌生。创新成为了作品存在意义的关键因素。尤其进入20世纪个性化写作以来，各种思想潮流相互碰撞，又共存一体，科学技术也以令人目眩的速度把我们推向一种尚未为人所知的未来。生活在这时代大背景中的科学家、艺术家，他们肩负起时代进步的责任，凭借自身对未来发展的先知预见去竭尽全力地发明创造具有时代性、个性和文化超前性的作品。这正是这些科学家与艺术家及其发明创造的科学成果和艺术流派，得以存在，为人颂扬和尊敬的根本所在，是历史进步的动力。作为准流派，还没有形成完整体系的频谱音乐，它也对音乐的诸要素，如旋律、节奏、和声、复调、曲式、配器等领域进行着深入的实验和研究，提出了新颖的观念，建立了相应的技术标准和实现手段。在本篇里将就这些内容做分类陈述。

第六章　频谱音乐的旋律形态

翻开频谱音乐的总谱，首先映入眼帘的乐谱形式就是大量射线型的直线持续，它们在多声部中结合使用，按照基音与它的谐波系列的关系，运用时间过渡的特征布局，形成一条缠绵不断的长江大河。表面看上去清风徐来，水波不兴，一片波平如镜的假象，实则在波面下是激流涌动，波谲云诡。它们蕴藏着巨大的能量，随时随地都有破面卷浪、势如破竹、汹涌袭来之势。让人不敢懈怠，听着心跳。这是频谱类音乐带给人，听、视觉的第一感觉，非常神奇！

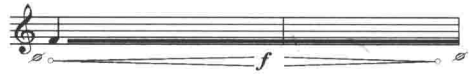
6.1　射线型旋律

例56：射线型旋律



(A)①

(B)②



(C)

说上面各自谱例是旋律线可能会引来很多人的不解，按照传统的理解，所谓旋律一定具有两个必要条件：一为节奏；二为音程。也就是说，旋律必须要有节奏的律动，音高的变化。旋律是由“一系列相继发出的‘音高线’，伴随着节奏的律动形成了它的要素”③。上面的谱例既没有音高变化，也没有节奏（显性）变化，怎么可能是旋律呢？确实，图谱 C 只是一条单音（等音）射线，它不能成为旋律。但是加入触弦点位置（发音法）变化的（A）与加入力度变化的 B 就已经是旋律了，只不过这里的旋律概念变化了。旋律不仅仅是停留在音高层面，仅指音高、音高组织的节奏两个因素了；旋律拓展到了音色、力度层面上去了，即音色节奏与音色变化，也可以构成旋律。如勋伯格提出的音色旋律。力度节奏与力度变化，也可以构成旋律，我们姑且把它叫做“力度旋律”。也就是说，声音的物理三个主要属性：音色、音调、响度都能构成旋律。这种旋律，我们把它称之为“静止的律动”，它是频谱音乐用得最为广泛的旋律形态之一。

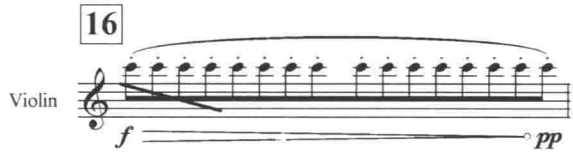
从三维的角度看，这种旋律的 Y 轴的邻音差为零；X 轴的节奏数比和单位节奏值无法计算，二维属性都为静止。只有第三维 Z 轴，存在因发音法的变化，随时间过渡性而显现的谐波分布、振幅数值也相应变化，律动在深度轴上进行，因而称为“静止的律动”。

6.2 直线型旋律

直线型旋律形态是指同音重复构成的旋律。它可以分为下列两种情况：

（1）等时值构成的直线型旋律

例 57：直线型旋律　摘自 T. 缪哈耶《瑟弘迪》[4]（*Serendib*）排练号 16 处



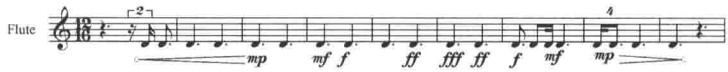
X 轴・节奏数比：1∶1

Y 轴・旋幅带宽：音数为 0（同度）

Z 轴・力度级数：f—（mf—mp— p）—pp 五级

（2）不等时值构成的直线型旋律

例 58：不等时值直线型旋律　摘自 G. 格瑞瑟《时间的漩涡 III》[5]排练号 26 处



不等时值节奏包括各种节奏关系构成的节奏组织，如自由节奏、等差节奏、等比节奏、不等差、不等比的特殊序列节奏，等等。上例是较为简单的节奏组合。

Y 轴・旋幅带宽：音数为 0（同度）

Z 轴・力度级差：无声……mp—mf—f— ff— fff 六级及它们的逆行。

X 轴・节奏数比：重复时值节奏只算一个，以十六分音符为单位节奏值，上例的节奏数比为：3/2∶3∶6∶3∶2∶1∶6∶3/2∶9/2∶6。

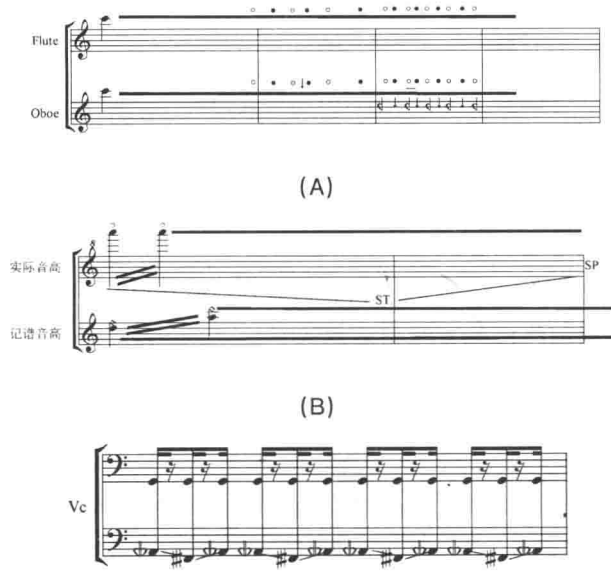
直线型旋律满足了传统旋律“二重性”的节奏特征，但在音高上却没有变化，只因它在第三维度 Z 轴的力度级数、演奏法等参数的变化，从而使它成为了实实在在的旋律线条。

6.3　拍音型旋律

所谓拍音就是指两个频率相差不多的音，它们的和振动形成“强”的振幅，差振动形成“弱”的振幅，这种一强一弱的周期变化就称为“拍音”，每秒钟这种“强弱”周期变化的次数称为“拍频”。利用这个现象可以校准乐器的频率或进行声频的测量。

拍音型旋律形态是利用声波振动的拍频现象而来，在拍频音乐中主要有下面几种表现类型。参见例 59。

例 59：拍音型旋律　分别摘自肖武雄室内乐作品《佛光穹影》第 28、67、165 小节



在上面谱例（A）中，长笛要求用不同的指法演奏“同一个音”可以肯定它们的音高是不会完全相同的，肯定存在音高微差。就像下一行的双簧管一样，Oboe 干脆把这种实际存在的音高微差标示出来，以示强调。

即 Oboe 在比小字三组 c^3 低八分之一与低四分之一的音域范围内，来回摇荡，Y 轴的旋幅带宽：八分之一音；X 轴的节奏数比为自由。也就是说，它已经满足了传统旋律的两个必然条件了，在二维（Y/X）参数上，旋律就已经存在。当然，深度 Z 轴的谐波变化，引起的音色旋律也同样存在。

谱例（B）中的小提琴运用同样的原则，在不同的弦上演奏出“同一音高”。由于弦的结构不同及触弦点的变化，会造成音高、音色事实上的微差。这种频率微差带来的拍频音响，谐波的干涉作用，是这种旋律存在的根本原因。谱面上的标识没有 A 中 Oboe 那样明显，但实际上是一样的。它同样存在旋幅带宽、节奏数比及谐波造成的音色变化。

谱例（C）中的大提琴运用三弦的空弦 G 音与四弦（C 弦）的滑奏（在比 G 高四分之一音与低四分之一音范围内滑奏），双弦作用形成一种音高差与音色差偏离效果的旋律线。

Y 轴的旋幅带宽：$\frac{1}{2}$（在半音音域内）；X 轴为等时值节奏，节奏数比

为1∶1。

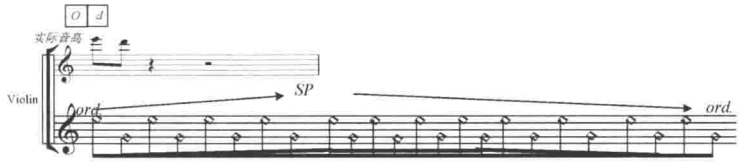
Z轴由双弦干涉，G弦断奏，C弦滑奏引起了音色、音高的变化偏离。

这些谱例都是运用了两个相似又含有微差的音高，利用它们的拍频现象写成的旋律线，它同时也满足了传统旋律概念要求的二重性（音高变化、节奏变化），这样的旋律形态称之为拍音型旋律。

6.4 锯齿型旋律

这种旋律因外形酷似锯齿波而得名，见例60。

例60：锯齿型旋律A　摘自缪哈耶《夕阳的十三种颜色》[6] 排练号[O] d处



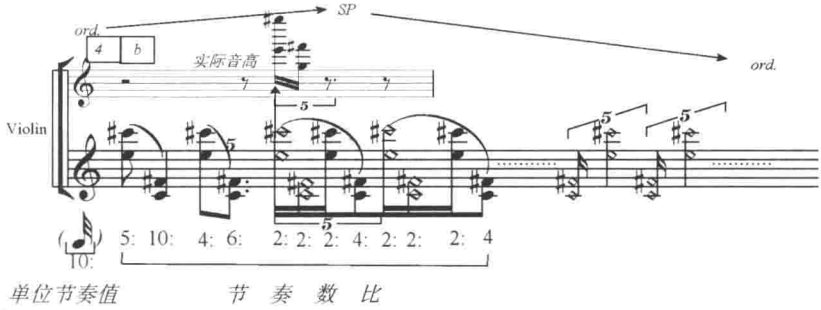
小提琴采用泛音，在二、三弦上，由正常位置向靠近琴马加速摇荡，而后再趋向正常位置减速迂回。

Y轴·旋幅带宽：大二度　（音数：1）

X轴·节奏数比：递减——递加

Z轴·触弦位置：ord.－Sp.－ord.

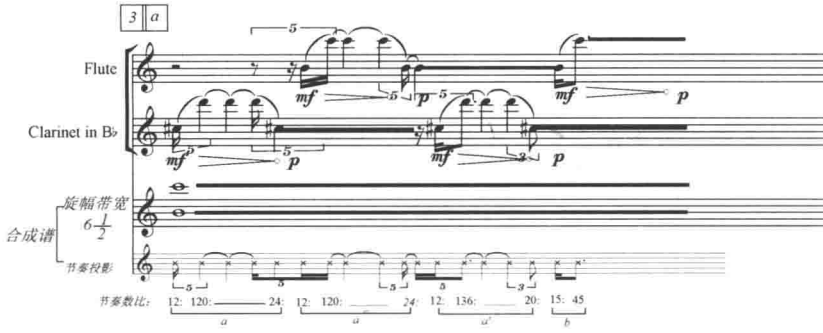
例61：锯齿型旋律B　谱例来源同例60


ord.
SP
ord.
4
b
实际音高
Violin
5
5
5

X 轴·节奏数比：只算第一个省略号前面节奏值，从谱中看，最小节奏值单位是十六分音符为单位的五连音，即 5∶4 的特殊划分，通过通分它们的最小共倍数为 20，节奏数比为 5∶10∶4∶6∶2∶2∶2∶4∶2∶2∶2∶4。

Z 轴·触弦位置：ord. —Sp. —ord.

例 62：锯齿型旋律 C　谱例来源同例 60



上例从谱面看，长笛与单簧管都演奏的是锯齿型旋律。把两行分谱合起来阅读可知，它们实际上演奏的是一个音数为六又二分之一的持续音程。

Y 轴·旋幅带宽：六又二分之一

X 轴·节奏数比：谱例中同时出现了三连音、五连音及均分为四份的基本划分，通过通分计算最小共倍数为 5×3×4 ＝60。

把六十均分为五份，得到每一个十六分音符五连音的单位为 12。

把六十均分为四份，得到每一个十六分音符标准划分的单位为 15。

把六十均分为三份，得到每一个八分音符三连音的单位为 20。

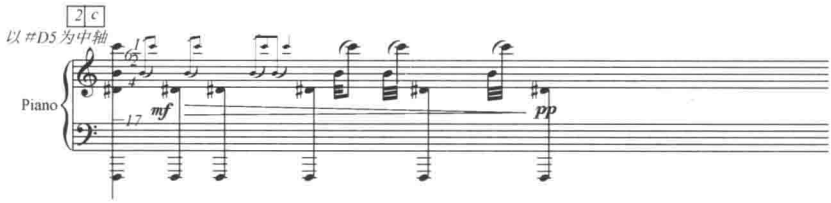
通过数据转换，得到旋律的节奏数比为 12∶120∶24∶12∶120∶24∶12∶136∶20∶15∶45。

可见其中藏有一个节奏动机：12∶120∶24 谱例中把它标示为 a，即抑扬抑格，紧接着节奏重复，再变形 a’，而后加入新的对比节奏 b。

Z 轴·力度级差：mf—（mp）—p，存在三个级差。

音色变化主要靠两件乐器的音高交替、音色化合来取得。

例 63：锯齿型旋律 D　谱例来源同例 60



第一个柱式和弦为旋律线的纵向投影，它正好标示出旋幅带宽的情况。图中数值表示邻音差值，取升 d^1 为中轴。

Y 轴·旋幅带宽：$6\frac{1}{2}+4-(-17)=27\frac{1}{2}$（四个八度再加一个纯五度）。

X 轴·节奏数比：由于谱例记录比较自由，不能严格算出单位节奏值，但是仍然可以看出这是一段减慢的旋律。因此，节奏数比：自由减慢，节奏值逐渐增大。

Z 轴·力度级差：mf—（mp）—（p）—pp，存在四个力度级差。

综上所述，可见频谱音乐的锯齿型旋律，通常是保持在一定的旋幅带宽以内，作非匀速的节奏律动。正因为节奏方面的非匀速，才使其旋律外形成为不对称的锯齿形。如果形成左右上下对称形旋律，那应该称为三角形（或正弦形）旋律了，这在传统音乐中比较多见（比如分解和弦形旋律）。实际上，锯齿型旋律除了有上面列举的持续性表述外，还经常以阶梯形上行、下行旋律形态来表述。由于这种阶梯形上下行旋律与 ADSR 包络的起奏、衰减两个阶段的外形表现正好一致，因而把它们单列出来作为一种独立的旋律形态来介绍。为的就是把 ADSR 包络的时间过渡性特征，贯穿于旋律的写作之中，使作曲家与音乐理论家形成包络透视的分析习惯。

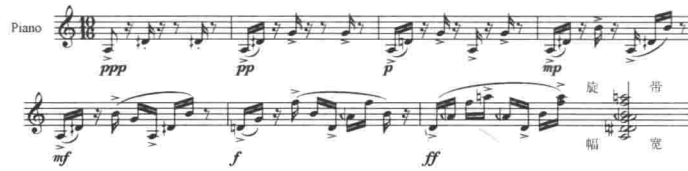
6.5 阶梯型旋律

从脉冲波的角度来理解，阶梯型波是一种不同于锯齿波的新波形。计算机作曲就是通过所采样本的数据来控制电脉冲振幅，产生相应的电脉冲序列，这就是从数字到模拟的还原，再让电脉冲通过滤波器，形成给定声波的电信号来驱动扬声器。计算机音乐的特点就是它具有最大自由度，唯一约束它的声响效果的物理因素是扬声器的性能，因此人可以编制自然模拟声、乐器声、超自然声响的一切声波波型，这种音乐手段充分发挥出人类的想象力。

常见的脉冲波形：矩形波（方波）、锯齿波、三角波、尖脉冲波、阶梯波等，脉冲通过调节还可以产生任意波。

（1）增益型上行阶梯旋律

例 64：增益型上行阶梯旋律 A　摘自 G. 格瑞瑟《时间的漩涡 III》Ricordi 版



从谱例中可以看到，这种旋律形态在横向 X 轴上的节奏特征并不明显，如果把休止音符都作为实音来看待的话，它们的节奏数比是 1∶1 的等时值节奏（以十六分音符为单位）。倒是发音点的移动呈现出一种“游动节奏型”具有一些特点。这种旋律的主要特征来自于它的纵向 Y 轴旋幅方面，它采用锯齿型的阶梯进行，上下跳进，使得整个旋律达到很宽的旋幅带宽。

X 轴・节奏数比：1∶1 等时值节奏，全都以十六分音符为单位。

小节发音点布局：

|1 2 4 8 |1 2 4 8 |1 2 4 6 8 |1 2 4 6 7 8 |1 2 4 5 6 7 8|1 2 4 5 6 7 8 9|1 2 3 4 5 6 7 8|

这事实上是 3＋2＋2＋3 的节奏律动。

Z 轴・力度级数：ppp—pp—p—mp—mf—f—ff，共七级。

Y 轴・旋幅带宽：12（两个八度），如果不记同音重复，也不取中轴音，而把上行跳进记为正“＋”（正号可以省略）下行跳进记为负“—”，上例的旋律的邻音数比如下：

$$2\frac{3}{4}:-2\frac{3}{4}:2\frac{3}{4}:2\frac{1}{4}:-5:2\frac{3}{4}:2\frac{1}{4}:-5:5:-5:2\frac{1}{2}:4\frac{1}{2}:-7:2\frac{1}{2}:4\frac{1}{2}:-7:2\frac{3}{4}:4\frac{1}{4}:-2:$$
$$-5:2\frac{3}{4}:4\frac{1}{4}:-4\frac{1}{2}:2\frac{1}{2}:5:-3:-4\frac{1}{2}:3\frac{1}{4}:4\frac{1}{4}:-3:-4\frac{1}{2}:3\frac{1}{4}:4\frac{1}{4}:2:-6\frac{1}{4}:-3\frac{1}{4}:4\frac{1}{2}:5$$

可见最小邻音数为 2，即大三度，仅出现两次；最大邻音数为 7，即大九度，出现一次。

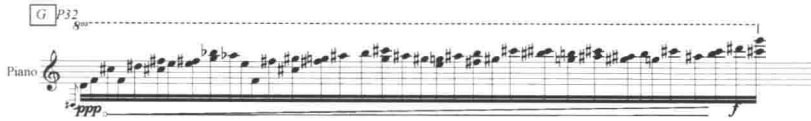
跳进是旋律最主要的特征。其中大量使用四分之一微分音高。

例 65：增益型上行阶梯旋律 B　摘自 G. 格瑞瑟《起源》[7] 排练号 22 处

这个旋律的外形更能体现增益型上行阶梯旋律的特征，音高根据曲线

做自由进行，节奏等时值，只有力度存在三级变化：mf—f— ff。

例 66：增益型上行阶梯旋律 C　摘自 T. 缪哈耶《遗忘的土地》[8]（*Territoires de l'oubli*）总谱第 32 页



X 轴·节奏数比：等时值 1∶1

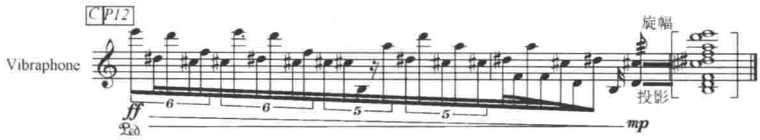
Z 轴·力度级差：ppp—（pp—p—mp—mf）—f，共六级。

Y 轴·旋幅带宽：20（三个八度加一个大三度），除此以外，它还有一个显著特点：旋律进行中夹持有大量和声音程，使其与单音发音点形成音色、密度的对比。

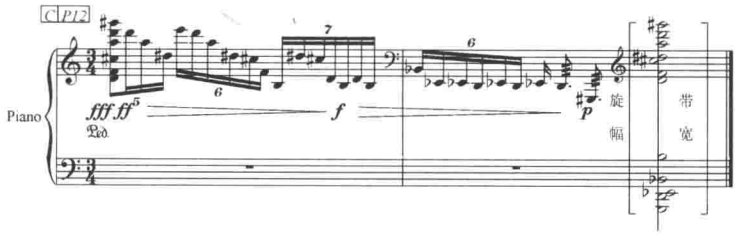
上面所列举的谱例由于与声音 ADSR 包络的起奏（attack）阶段的特征完全吻合，记录了声音增长第一阶段的时间过渡性特征。因而，取名为：增益型上行阶梯旋律。通过频谱离散图，我们很容易发现声音的起奏时间相对于衰减和保持阶段来说是很短的，所以在频谱音乐的总谱中，这种增益型上行旋律使用得也要相对少一些。这是作曲家充分研究了声音的物理属性的反映。

（2）衰减型下行阶梯旋律

例 67：衰减型下行阶梯旋律　摘自 T. 缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页



(A)



(B)

上面两个谱例取自乐谱的同一个位置，颤音琴与钢琴从同一个起点，以相异的步伐下行阶梯进行。对照两行谱，我们会发现很多结构性因素的秘密。

Z轴·力度级差：（A）ff—（f— mf— ）mp 四级

（B）fff— ff— f—（mf—mp）—p 六级

X轴·节奏数比：为了便于比较，以四分音符为单位拍，来看两行谱例的节奏关系，不再以节奏最小值作为单位。

（A）6－6－5－5……特殊划分

（B）5－6－7－6……特殊划分

可见，除了第二个单位拍上同步以外，其余拍上都异步，这种节奏的异步性正是为了追求发音点的错位，以求得加强密度，模糊音响的目的。

Y轴·旋幅带宽：对照两行谱例的纵向投影，可见它们是由相同的和弦构成。只不过钢琴旋幅带宽更宽一些，音数总和为30（五个八度），主要加了低音部的和声音（G_1－D－降E－降B）；颤音琴的旋幅带宽小一点，音数总和为14＋1/2（两个八度加个纯四度）。它相当于是钢琴音域的局部覆盖。这两条旋律的真正核心因素正是构成旋幅带宽的和弦（即两条旋律的音高组织同源），它们各自以不同的节奏、不同的音高次序、不同的邻音数差，做同趋相，非平行的下行倾泻。中途时而还出现声部交错，形成疏密相间、宽窄相异的旋律线。这种类型的旋律线正好反映了声音的衰减（decay）阶段的特征。由于声音ADSR包络的第四阶段释音（release）也具有这些特点，因而这种衰减型下行阶梯旋律在频谱音乐的总谱中使用很多。

上例两条旋律还可以看成是“化纵为横”构成的旋律线。

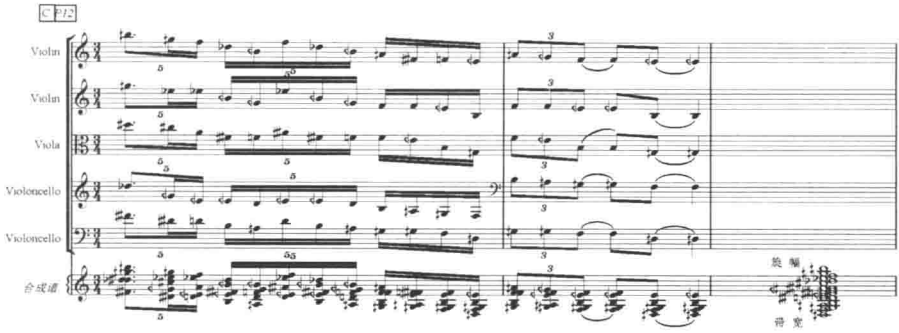
所谓化纵为横就是指：横向的旋律已经存在，但它是由纵向的和弦投射的音高质子构成的包络，是音高的频率扫描。看过频谱图就会知道，高频泛音由于其波长短，因而在媒介传播过程中最先消失，而频率低一点的泛音，由于其波长相对长一些，因而在媒介中的传播时间也要相对长一些。不同频率的谐波，相应参数的包络就可以构成该参数的旋律。诸如音高旋律、振幅（力度）旋律、音色旋律，等等。上例的旋律线正好反映了频谱离散图的包络特征。

注意：音阶式的上下行斜线旋律，由于使用不多，而且机械、呆板，因而不收入旋律形态中专门论述。

6.6 带状旋律

下面再以T. 缪哈耶的作品《瑟弘迪》（*Serendib*）为例，找位于上例同处的弦乐织体来说明带状旋律属性。

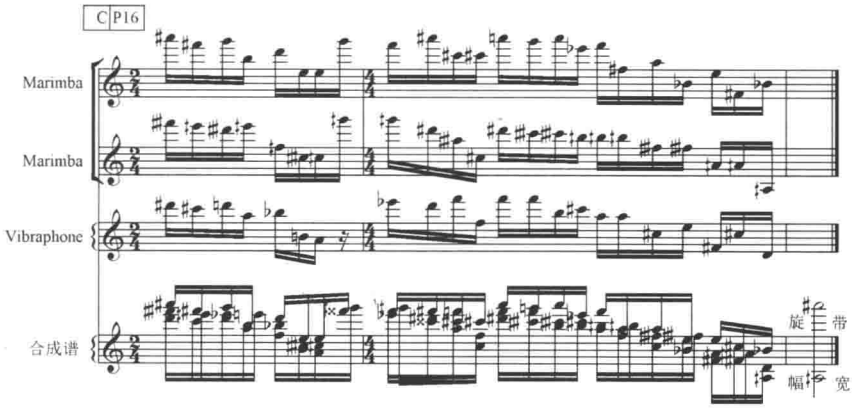
例 68：带状旋律 A 摘自 T. 缪哈耶《瑟弘迪》弦乐部分总谱第 12 页



通过上例的弦乐分谱及合成谱可以看出，这是一个完全典型的带状旋律，节奏完全同步，但是中途有音程调整，从而使其成为了非平行的带状旋律线条。

值得注意的是构成这个带状旋律的音高素材全部发生了改变（参见旋幅带宽，并与例 67 中列举的两个谱例的旋幅带宽及构成的和弦音高进行对比），它们是出现在同处（即排练号 C 第 12 页）例 67 中的颤音琴与钢琴的组成音高为倍频和弦，而这里的弦乐音高组成为旁频和弦，详细论述参见和弦结构一章。

例 69：带状旋律 B 摘自 T. 缪哈耶《瑟弘迪》弦乐部分总谱第 16 页



这个带状旋律的最大特点就是声部交错大量存在，各声部不以各自的独立为目的，而以各自的干扰、模糊为己任。如果把第一马林巴理解为载波旋律的话；第二马林巴（由合成器演奏，标准音高定高四分之一音，上例谱中已经转为实际音高）就是干涉波旋律；颤音琴演奏的就是调制波旋律，它们相互纠缠，拒绝清晰，最终形成螺旋麻花型旋律。

X 轴 · 节奏数比：1∶1 等时值节奏

Y 轴·旋幅带宽：18+1/4（三个八度加一个四分之一音）

Z 轴·音色·旋律波形：交混、干涉

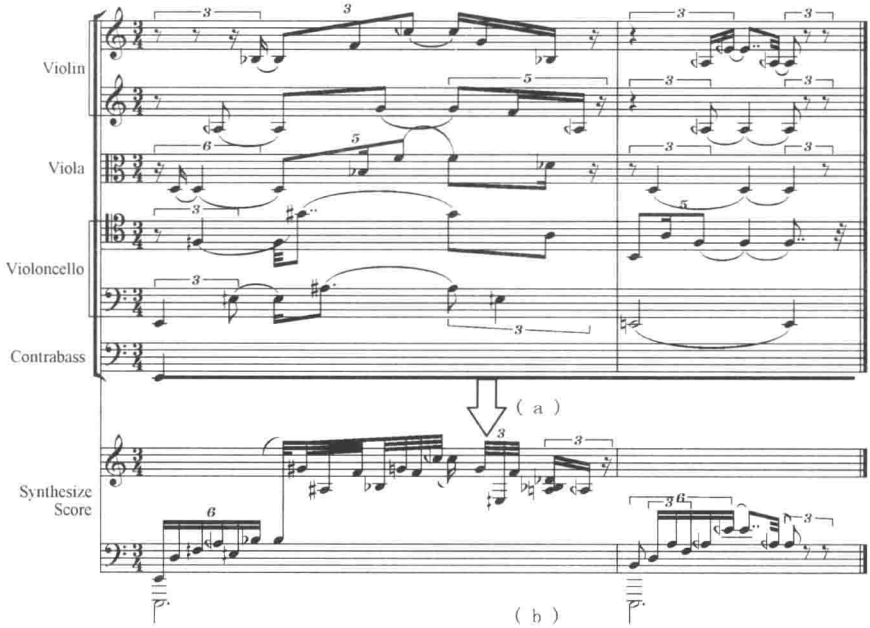
带状旋律在印象派作曲家德彪西的作品中使用最多，而且它们多以平行高叠位和弦的形式表现出来。在频谱音乐作曲家的作品中，同样也继承了他们的前辈作曲家德彪西开创的技术精华，同时又创造性地发展了这一技术。在此我们把例 67 中列举的（A）与（B）两个谱例合并起来阅读，它们合成的旋律就是一个带状旋律。可以看出，旋律发展的趋向一样，构成旋律的音高组织也是取自同一和弦；不同的是它们的邻音数差，即旋律发展的跳进矢量（方向和音程度数）都不一样，当然发音节奏也不一样，从而形成了不平行的、发音点也不统一的带状旋律。这正是频谱音乐对带状旋律形态的贡献所在，即频谱音乐使用的带状旋律不需要追求旋律外形的统一（不要满足节奏、局部旋法方向和整体的平行这些条件），可以大量出现声部交错、矢量相反、节奏异步，各自声部独立，整体趋向一致，音高组织同源（甚至不完全同源，而由本源变异产生的新源）的旋律形态，都可以称之为“带状旋律”。这里的带状旋律也包括了它的传统意义（即同步性、平行性），只不过这种传统、初级形式的带状旋律在频谱音乐中使用很少。

应当指出的是，这里说的带状旋律还有一个发展渊源，那就是古典音乐中的等量复调。与此相关的问题将在后面复调内容中详述。

6.7 合纵旋律

合纵旋律是指由各声部纵向叠加构成的合成旋律。这是与 6.5 阶梯型旋律一章中介绍的化纵为横、频率扫描相反的旋律构成形态，参见下列谱例。

例 70：合纵旋律　取自 T. 缪哈耶《瑟弘迪》弦乐部分总谱第 9 页



从谱面上看，每一个单独声部的旋律都是由三两个音迂回重复而成，旋律性并不十分明显。但如果把各自声部的旋律线叠加起来，就能在 X 横向轴上合成一条旋律线。这个隐性的旋律才是真正的本真旋律。各自分布的旋律线条是它横向的节奏分离，梅西安及鲁托拉夫斯基把这种手法称为“影子和声”或“附加共鸣”。事实上，这种旋律还具有勋伯格倡导的音色旋律的属性。

注释：

① ST 表示弦乐器靠指板演奏，SP 靠琴马演奏，不同的触弦点会抑制不同的谐波分布，从而达到改变音色的目的。

② ₵ 表示从无声开始（或结束到无声），逐渐改变力度级数。

③ 姚恒璐：《现代音乐分析方法教程》，湖南文艺出版社 2003 年版，第 40 页。

④ T. 缪哈耶：《瑟弘迪》（*Serendib.*）（1991/1992），为 22 位演奏家而作。（commissioned by Ensemble Intercontemporain）Paris：Editions Lemoine.

⑤ G. 格瑞瑟：《时间的漩涡 I、II、III》（Vortex Temporum I、II、III）（1994/1996），为钢琴、长笛、单簧管、小提琴、中提琴、大提琴而作。Ricordi 出版社出版。

⑥ 《夕阳的十三种颜色》（*Treize couleurs du soleil couchant.*）（1978）为长笛、单簧管、小提琴、大提琴、钢琴与电子扩音器而作。（commissioned by the Paris Goethe Institut）Paris：Editions Transatlantiques.

⑦ G. 格瑞瑟：《起源》（*Derives*）（1973—1974），为大型管弦乐队而作。Ricordi 出版。

⑧ T. 缪哈耶：《遗忘的土地》（*Territoires de I'oubli.*）（1976—1977）。Paris：Editions Transatlantiques.

第七章 频谱音乐的和弦建构

在上篇结语中提到了“传统四大件”在频谱音乐中的存在问题，由于四大件本身的科学性，它们是融会贯通于频谱音乐的组织结构中的。同时，频谱音乐声音合成原理的特殊性，也拓展了传统四大件的组织原则，使其成为更加连接紧密、不可分割的整体。在一定程度上它确实对“旧容器意义”做出了修订。这也是频谱音乐之所以成为频谱音乐，成为一种“准流派”的重要原因，是其“风格”的显著标志。以下把研究重点放到频谱音乐的和弦建构及和弦连接的结构原则方面。

从物理学的角度来看，非线性矩阵频率主要是由间谐波构成，线性矩阵主要是由旁频构成，第一集合音列主要是由倍频构成。我们把此理论引入到频谱音乐的和弦建构中，就可以把频谱音乐的第一集合音列、线性和非线性矩阵转化为不同协和等级的和弦结构。

7.1 倍频和弦

传统音乐中使用的都是基音的整数倍上的泛音，通常称为“自然泛音”。比如我们使用的乐理、基础和声都是建立在自然泛音上的学科。传统和声学只建立到对自然泛音的前 16 个泛音的认识。1—5 号泛音建立大三和弦；6—7—9 号泛音建立小三和弦；4—5—6—7 号泛音建立大小七和弦；再加入 9 号泛音变成属九和弦、加入 11、13 号泛音成为属十一、十三和弦；到此程度就建立起了整个基础和声体系。传统三度叠置的和声只是揭示了声音的最佳共鸣原则（建立在相邻临界带中的最结实、共鸣的和弦），甚至可以说整个西方的音乐理论和乐器的最主要的特性就是共鸣。但是，对于为整个音响音色体系的调色、融合作用而言，仅用共鸣手段是不够的。我们还应该去使用非共鸣和人工可调节共鸣原则。这就促使我们要去揭秘微分音及其众多非整数倍上的泛音结合原理，从而给我们打开了一个更为广阔的世界——20 世纪后半叶逐渐发展成熟的极限认识论，为我们提供了去探索和再认识这种客观存在的“微观世界”的条件。为了便于理解，以下让我们先来研究整数倍的倍频和弦。

倍频和弦的组成依据

倍频和弦的和弦音必须满足下列条件：

1. 它必须是基音的整数倍泛音（又叫倍音，因其频率也是基频的整数倍，故而叫倍频）

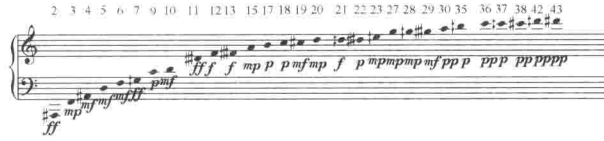
2. 它必须要形成局部的共振峰值，也就是振幅，声强级相对大。（如第二章 2.3《实验泛音》例 17 中黑体加粗的统计数据就为共振峰值），由于这个峰值具有相对性、间隔（区间）性，根据不同的目的，可以在同区间内（如 2.3 实验泛音例 18 中每一个框线中）提取某一个音。

3. 通常避免出现同音名的八度重复，使得所取之音具有唯一性。（也就是说，序数与它的二倍数泛音不能同时提取，比如，用了 3 号泛音，就不用 6 号泛音；用了 5 号泛音就不用 10 号泛音。基音与 2 号泛音很少用来做和弦音，只有在追求特殊协和目的时才用。）

可见不是所有的泛音都适合做倍频和弦音，也不是所有的相对最大共振峰音适合做倍频和弦音，如果这个音出现了同音名的八度重复，就必须舍去，否则和弦会过于协和、空泛。

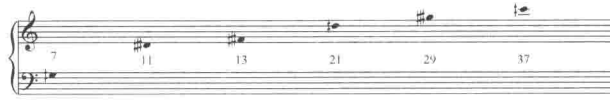
下面是 T. 缪哈耶以升 A_2 为低音（基音），测出的泛音和力度级（共振峰）。（其中有些序号泛音省略）

例 71：T. 缪哈耶以升 A_2 为低音（基音），测出的泛音和力度级（共振峰）



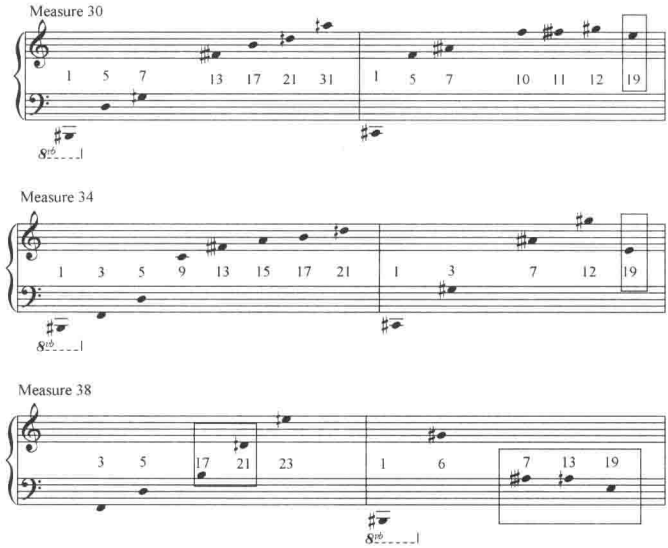
根据上方三个条件，他提取了其中的 7、11、13、20、29、36 号泛音（第一集合），即：

例 72：T. 缪哈耶以升 A_2 为基音，提取的共振峰泛音



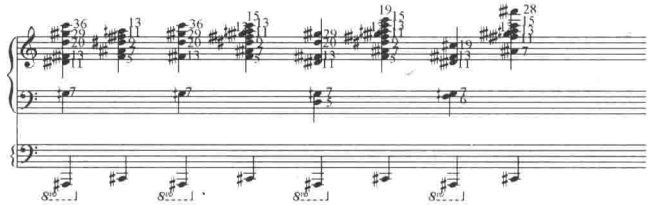
缪哈耶在作品《瓦解》开始部分，正是以钢琴升 A_2 和升 C 为基音来组织共振峰倍频和弦的，为了便于比较，把两个基音及它们的共振峰倍频音高同时取出，置于同一谱表中，左边为升 A_2，右边是升 C 的基音与倍频。[注意：两个基音相差小十度，为了便于比较有一些倍频音高作了一个（或是数个）八度的调整。]

例 73：以钢琴升 A_2 和升 C 为基音的共振峰音列



由上面的基频及倍频音建立了下列倍频和弦。

例 74：以钢琴升 A_2 和升 C 为基音的共振峰组成的倍频和弦



共振峰和弦属于特殊的倍频和弦，是频谱作曲家最广泛使用的和弦结构形式之一。卡尔嘉·萨瑞拉禾（Kaija Saariaho）在 IRCAM 做研究员期间（1984—1985），创作了《亭院秘密 I》（*Jardin Secret* I），她运用频谱离散反映的包络特征，在作品的最后部分使用了一系列共振峰和弦，下面是其中几个和弦使用的情况。

a）反映了作曲家选择的和弦（a，b，……g 表示各自和弦）中间一列表示和弦持续的时间，最后一列表示由一个和弦滑奏到下一个和弦的变化时间。

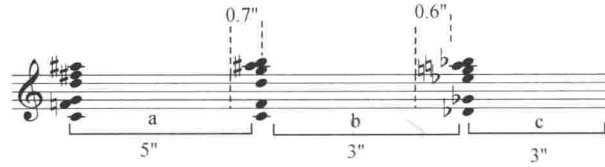
b）记录了其中的三个和弦变化持续时间。

例 75：卡尔嘉·萨瑞拉禾《亭院秘密 I》[①]的倍频和弦运用

a)

Chords	Duration seconds	Duration of transitions
a	5	0.7
b	3	0.6
c	3	0.4
d	2	0.3
e	4	0.2
f	3	0.5
g	2.5	0.5

b)



缪哈耶强调的“第一集合和弦”主要就是指由共振峰组合形成的倍频和弦，它们在频谱音乐中属于第一级协和和弦。

7.2 旁频和弦

旁频是不在基音直接产生的第一级谐波系列之中的，它是属于谐波系列的子系列中的音。在上一章声音合成中，加减法合成、振幅合成、环形合成产生的音列和矩阵中的音都属于旁频音高。由它们产生的和弦，就叫“旁频和弦”。也就是说，旁频和弦是第一级谐波系列的繁殖和弦，它必须符合旁频公式：

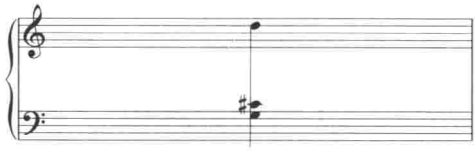
$$W_{sb} = W_c \pm W_m$$

旁频和弦在早期频谱音乐中广为运用，比如杰勒德·格瑞瑟的作品《分音》、《调制》，提斯坦·缪哈耶的《夕阳的十三种颜色》、《遗忘的土地》、《太空》、《忆/蚀》，等等。下面就从缪哈耶的钢琴作品《遗忘的土地》的E部分节选一个例子予以说明。

作品先选择一个倍频和弦，由G—升C—D构成，分别取名为a、b、c音。按照传统理解升C—D是一对不协和的音，但是它们的不协和性已经被加入的G音软化了，因为G音又可以成为它们的共同倍音（G是升C的11号倍音，G是D的43号倍音），这也是缪哈耶取这和弦的目的所在。参见例76。

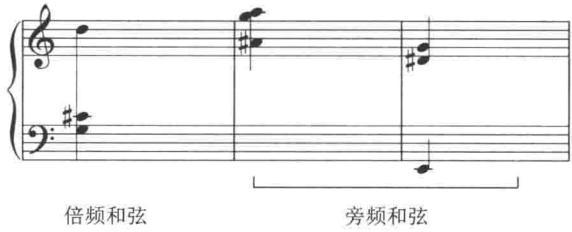
例76：缪哈耶在钢琴作品《遗忘的土地》E部分的和弦

（A）原始倍频和弦



而后它利用这个倍频和弦的自身繁殖生成系列旁频和弦。

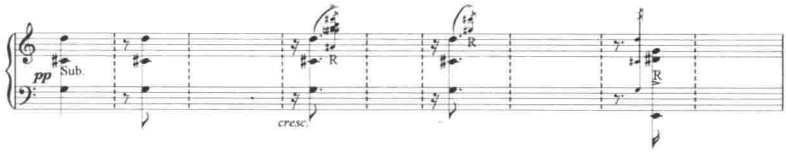
(B) 生成旁频和弦



a	a+b	a−c
b	a+c	a−b
c	b+c	b−c

这三个和弦在作品中直接运用于 19 页总谱中，参见例 77。

例 77：缪哈耶在钢琴作品《遗忘的土地》E 部分和弦呈示　总谱第 19 页



在上篇 5.2《变形合成》第二节的环形调制中已经列举了格瑞瑟的《分音》与缪哈耶的《忆/蚀》的声音合成原理（参见例 48 和例 49）都实证性地说明了倍频与旁频和弦的运用情况。

旁频和弦除了运用倍频和弦来生成以外，也可以由载波与调制波繁殖出来的旁频矩阵直接构成。比如缪哈耶在作品《瓦解》（*Disintegrations*）第 IX 部分的弦乐器的频谱调制中，他设定了一对音程（升$\frac{3}{4}$C—升$\frac{1}{4}$A）分别作为载波和调制波，生成了纵横三十个不同频率的旁频音高，形成了六组矩阵，这六组矩阵在作品中连续出现，形成了作曲家称为的“扫描”效果。化横为纵、纵中生横，形成了交相辉映的织体关系。每一个单独声部类似于分解和弦在陈述，声部的纵向每一个横切面都构成同中有异的动态和弦关系。详细情况参见第五章之 5.2《变形合成》第一节振幅调制的

相关内容。

7.3 间谐波和弦

上篇理论建模中的频谱基础内容里已经介绍了间谐波的形成条件，它们都为基音的非整数倍谐波构成。不仅如此，而且它们也不满足旁频公式。换句话说，它们要比旁频更加复杂，更不协和。我们可以近似的把频率调制生成的矩阵，以及由谐波失真产生的偏离、扭曲谐波都归入间谐波，由它们产生的和弦称为间谐波和弦。以下先把间谐波和弦生成的条件做一个介绍。

（1）由频率调制生成的间谐波，它们满足于频率调制公式：

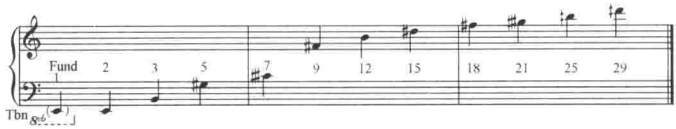
$$W_{sb} = W_c \pm n.W_m$$

参见第五章之5.2《变形合成》第三节频率调制内容，缪哈耶在作品《龚德沃呐》（*Gondwana*）中的运用，“例55中列举的矩阵”就是直接生产间谐波和弦的元素。

（2）由谐波失真、扭曲产生的间谐波和弦。

缪哈耶在创作《瓦解》（*Disintegrations*）时，是以长号的最底一个 E_1 音（事实上这个音发不出来）作为基音，测出它的频谱得到了下列基本发音列。

例78：长号 E_1 频谱音列

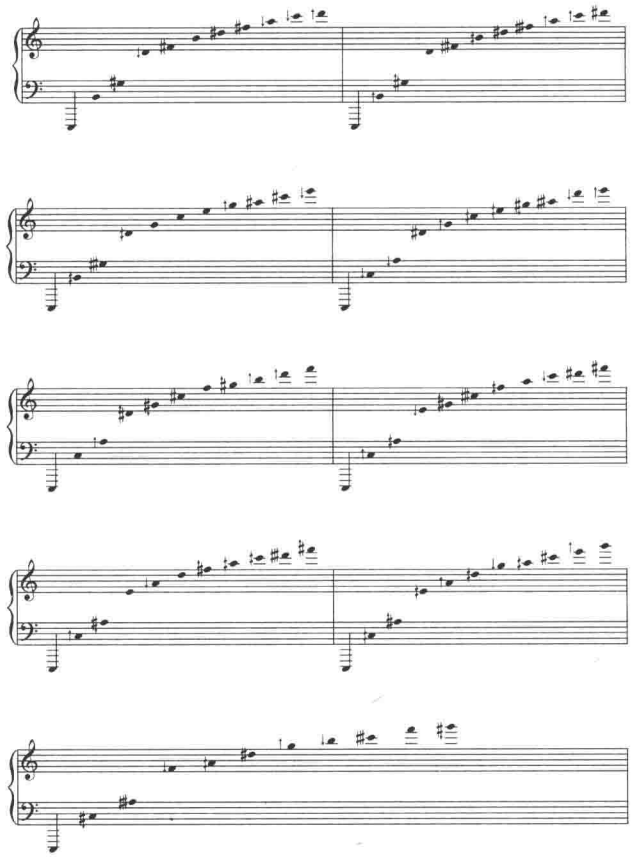


从音列中可以看出长号的波形是以方波和锯齿波为主，间插有脉冲波。这是因为泛音序数反映了长号基音的泛音都存在（也就是说，乐谱最后一个泛音之所以是29号泛音，证明在它之前已经有二十八个泛音了，谱面没有把诸如28号这样的泛音记出来是因为这些泛音的振幅相对“弱”，已经被谱面所提取的这些泛音屏蔽掉了，因而不能错误地理解谱面没提取的泛音就不存在），所有序数泛音都存在，这正是锯齿波的依据；另外，奇数泛音明显占据重要位置，证明它们是共振峰倍频泛音，这是方波的特征；再则，并非所有的奇数泛音都得到重视，所取的音列存在一定的不规则性，证明了脉冲波的存在。总之，长号的谐波非常丰富。

下面就是以长号的这个最初的泛音列为基础，对它进行人工电子设备

化的调制达到的失真频谱泛音：

例 79：缪哈耶《瓦解》（*Disintegrations*）第十部分长号的失真频谱



仔细对照原谱与失真谱会发现失真的方式是采用逐渐提升频率的办法来达到的。这种手法在电子乐器中很容易达到，只需要在声音输出端口加个失真效果器，就可以把任何乐器的声音改变。试问常规乐器怎么达到这种效果？长号本身的谐波有无这些音高？根据上篇的频谱理论分析，我们已经知道了在倍频泛音之间存在非整数的间谐波泛音，但是这些泛音谐波仍就是少数，而且处于不显著位置。那么上述失真频谱音高，正好把基音的倍频音高全部去除，用人为的方法来提升间谐波的作用，使其构成一种相对于倍频泛音更加不协和的和弦结构。上面的谱例针对于效果器仅仅是失真开关逐渐增大的过程，调调旋钮即可达到。但是相对于常规乐器来说，若想达到同样效果反倒要困难许多，它的主要意义在于通过常规乐器去模仿电声乐器来开拓新的音响效果，刺激和增强演奏家的挑战欲望。

以上得到的音列和矩阵，可以根据作曲家的需要任意组合成不同结构

的和弦（分解与纵横综合、分割与重叠等），这些仅仅是音列和矩阵的外在表现方式。频谱音乐作曲家同样重视线性化的写作（参见频谱音乐的旋律形态一章），常常喜欢把同一个和弦结构（参见旋律形态谱例的纵向和弦投影）分解在不同声部，以一种交混的形式出现。

7.4 和弦连接的逻辑依据

上面介绍了倍频和弦、旁频和弦、间谐波和弦等和弦结构。请注意这是笔者的划分，并非频谱作曲家的命名。格瑞瑟对和弦通用的词义没有异议，缪哈耶提出了“第一集合”名词，并认为它用来表现频谱音乐的音高素材及组织“源结构”更加贴切、合适，但是他对第一集合以外（或者叫“以后”，即第一集合的变异）的和弦结构没有作出清楚的鉴定。又笼统地回到了“和弦”的称谓。我通过频谱音乐与电磁、振动和声学等相关物理学内容的学习，了解到倍频、旁频、间谐波存在的事实，并且它们已经在物理学上广为运用，同时能更加清楚地来解释频谱音乐的组织原理，因而慎重借用了这些名词，把它们嫁接入频谱音乐的分析之中，特此说明。

还有一点需要说明的是，倍频、旁频、间谐波和弦的命名是相对的，千万不要绝对理解，就像传统和声中的正三和弦与副三和弦、调内和弦与调外和弦一样，它们只是相对于某个调式、调性而言，改变了调式、调性这种称谓也相应改变；倍频、旁频、间谐波是针对某个基音而言，基音改变，它们的和弦的意义和作用也会相应改变。也就是说，基音 A 构成的倍频和弦可以成为基音 B 的旁频和弦，甚至是间谐波和弦。所以，对于频谱音乐作品，找出作品的结构基础“基音”对于分析和理解作品具有至关重要的作用。

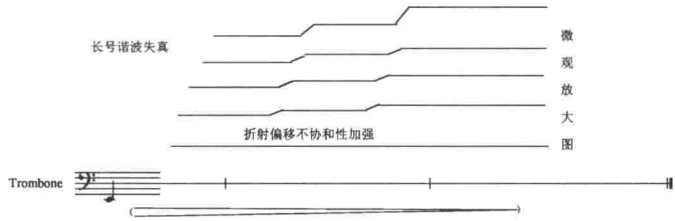
有了上述和弦结构，它们如何连接？连接的逻辑依据是什么呢？

通过声音合成原理的介绍我们找到了一对关键词“生成、繁殖”，它同样是和弦连接的逻辑依据。同时这种依据还包含有曲式的内容，即时间过渡性特征。对此，我们留到曲式中去讨论。除此以外，还有一个重要的美学价值观，就是协和与不协和的认识、布局与手段问题。关于协和与不协和的问题也作为一章专门内容留待后面讨论。在此，我们先来看看频谱音乐是通过什么和弦手段来达到协和向不协和发展的目的。

通过乐音向噪音的发展，“从光滑的频率到粗糙的频率，从周期运动到非周期任意律动”是音乐发展的基本原则。看了第一章《频谱基础》及第二章《泛音的作用》的相关内容，我们已经知道了在一个基音源情况

下，谐波分布的特点是：高频泛音越来越不协和，失真、扭曲、微分音大量出现，低频泛音，越低越协和（越靠近基音越协和）。因此，协和向不协和发展，在乐谱上的一般反映是由低频和弦向高频和弦发展。

例 80：缪哈耶《瓦解》结束部分的微观图



从图中可以清楚看见，乐曲是建立在长号 E 的基础上，先使用低频泛音构成的倍频和弦，而后逐渐向高频泛音发展，并且渐渐地抽掉基音，线条的每一次拐弯表示发生了谐波失真，出现了旁频谐波，而后再继续失真向间谐波发展。最终达到缪哈耶要求的“从光滑的频率到粗糙的频率，从周期运动到非周期任意律动”的目的。

上面图例虽然只是一个局部微观图形，但它同样也折射出频谱音乐作品的宏观结构原则，正所谓“观一叶而知天地，聆一音而悟有情”。

格瑞瑟在作品《调制》（*Modulations*）中同样以一个基音 E 出发，先建立四个倍频和弦（谱例中 A、B、C、D），而后调制出它们的变频和弦。即旁频和弦（A’、B’、C’、D’）和间谐波和弦（A’’、B’’、C’’、D’’）。

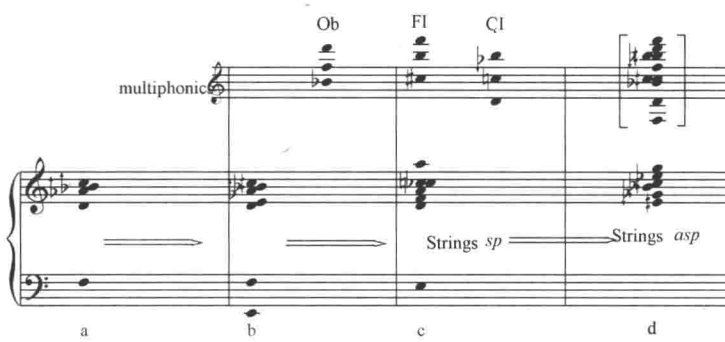
例 81：格瑞瑟《调制》[②]和弦演变频谱

仔细对照谱例会发现，调制后的旁频及间谐波和弦都比倍频和弦频率

高，它们也是频率提升调制的结果。

缪哈耶在作品《忆/蚀》（*Memoire/Erosion*）中以 F 作为基音，先建立一个倍频和弦（a）而后生成和弦（b），再加入木管乐器双簧管、长笛、单簧管的复音以及弦乐在琴马上的演奏构成旁频、倍频复合和弦（c），最后形成复杂的高叠位的间谐波、旁频、倍频混合和弦。由“a－d”从协和频谱向不协和频谱运动。音的组合突然增多，这是由于声音是球阵面传播，自我繁殖的。这种和弦生成方式及谱面的呈示是频谱音乐的重要特征，即频谱音乐很少像传统和声一样，和弦结构（和弦音的数目和音程关系）保持相对固定性。更多的情况是频繁，甚至突然地增加（生成），或是减少（衰减消失）和弦音数目，这是频谱音乐有别于已有的音乐流派的重要特征，同时它也给作品分析增加了难度。

例 82：缪哈耶《忆/蚀》中简单和弦向复杂和弦的过渡

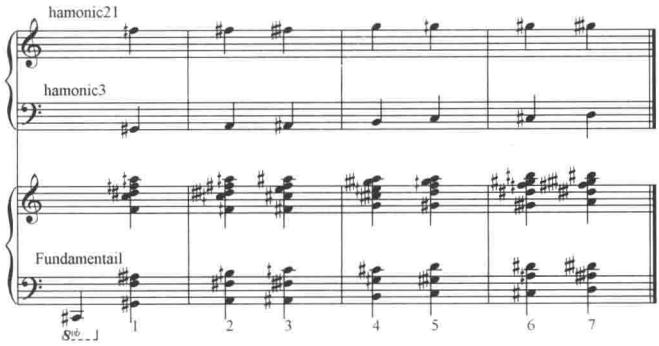


缪哈耶说：

> 无论频谱自然与否……协和，不协和，线性，非线性……重要的是频谱所反映的时间过渡性特征。它的协和、不协和，线性、非线性是被丰富了、提高了，还是相反。这是音乐曲式的根本，是微观发展到宏观的依据。频率，时间过渡性，频率的结合……和声甚至配器所有这一切都由它来决定。[③]

缪哈耶在作品《瓦解》（*Disintegrations*）第七部分中，以钢琴升 C_1 为基音，先建立了第一组倍频和弦（谱例中 1 号），而后人工调制出后面六组失真和弦结构（谱中 2—7 号）。谱例上方的两行为 3 号泛音与 21 号泛音的失真轨迹简化图，下面为完整图。

例 83：缪哈耶《瓦解》第七部分调制基音的协和频谱与它的失真



为什么说上面是人工调制的和弦呢？原因在于：

（1）同一个基音，每一个序号的泛音是唯一的，而谱例中的每一个横向关系表示的是相同序号的泛音，这在单一基音的谐波系列中不可能出现。

（2）谱例中最早出现的微分音横向关系出现在第六号泛音上（升 f—升$\frac{3}{4}$f），第二组和弦到第三组和弦间出现，它在单一基音的条件下，超出了微分音出现的下界（参见第二章《泛音的作用》）。

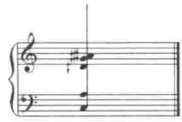
（3）第三号泛音是按半音升高，二十一号泛音是按四分之一音依次升高，证明这组和弦是按等频率调制。

综上所述，上述和弦在改变基音的情况下可以自然存在，基音依次提高半音，但在基音没有改变的情况下，不可能自然存在，所以它为人工调制和弦。由 2—7 的和弦结构皆为第一组和弦的失真，它们是第一组和弦的变频和弦，可以叫做“旁频”和“间谐波和弦”。这种和弦连接由于它的非自然性，随着调制的加大，逐渐提升了它们的不协和性。

下面再举一个更为典型的等频率调制，由协和频谱向不协和频谱发展。

缪哈耶在作品《瓦解》第三部分，先取了基音 F 的第 3、5、7、9 和 11 号泛音构成一个倍频和弦，参见例 84。

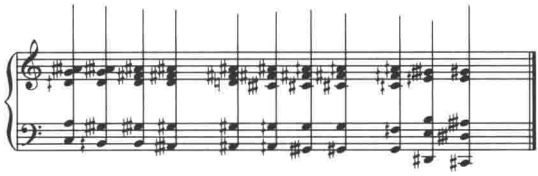
例 84：缪哈耶《瓦解》第三部分的倍频和弦



而后他把这个倍频和弦的最低音 c 向下依次移动十一次到达升 C，他通过计算知道这两个音高频率相差 61.5Hz，他按照 61.5÷11＝5.59Hz，

来均匀地向下（依据减掉一个 5.59Hz）调制这个倍频和弦，从而得到了下列十一个和弦结构，达到了由协和频谱向不协和频谱发展的目的。

例 85：十一等级频率移位



上述和弦由于在极低音区（3 号泛音）处都已经出现了微分音，它超出了正常钢琴的最低极限可能性，因而在自然音领域是不可能存在的。这是运用了电子音乐的低频振荡器原理（频率范围 0.1—20Hz）来调制谐波结构，所以得到的结果是最不协和的变频和弦。

这种违反频谱谐波分布规律，反其道而行之的事例再次告诉我们：认识声音本质的目的不仅在于还原声音，更在于去创造声音。创新才是作曲之本。

注释：

① 卡尔嘉·萨瑞拉禾（Kaija Saariaho）作品《亭院秘密 I》（*Jardin secret* I）（1985）为磁带而作，而后于 1986 年续写（*Jardin secret* II）为大键琴和磁带而作，1987 年续写（*jardin secret* III）为弦乐四重奏而作。

② G. 格瑞瑟《调制》（*Modulations*）（1976—1977）为大型室内乐而作。Ricordi 出版社出版。

③ Tristan Murail ：Spectra and Sprites，Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，pp. 137—147.

第八章 频谱音乐的复调特征

按照传统认识，复调可以分为模仿复调与对比复调两大类。频谱音乐高度地模糊了这种分类的界限。比如在声音合成一章列出的诸多音列矩阵、折叠效应，它们本身就已经构成了两声部复调。那么它们是对比关系，还是模仿关系呢？很难回答这个问题。这些矩阵具有下列特征：

1. 它们来自同一个基音，这使它们具有同源性。

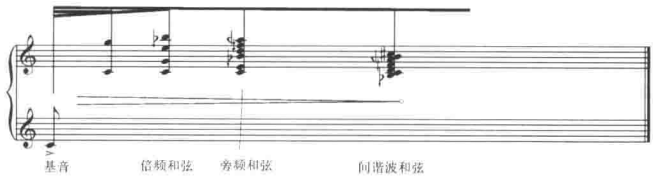
2. 它们来自同一个音程，只不过一个音成为了载波频率，另一个成为了调制频率，生成了属于自己的子系统（原基音的孙系统）。亲缘性不可怀疑。

尽管它们的音高、相位、声音的紧张度确有不同，但这仅仅是表象而已，其本质的亲缘性，乃至同源性已经是不争的事实。那么由它们生成的复调属于模仿还是对比关系呢？可见频谱音乐无论是在音的关系上，还是在复调织体的外在表现上都已经有别于传统理论。那么是不是频谱音乐摒弃了复调思维呢？其实不然，事实上，复调思维仍然在频谱音乐作品中大量出现，只不过它们变异了，更多地融入了电子音乐的特征。不再追求表面的形似，更加看重内在的神似及更深层次的联系。

8.1 由回声构成的模仿复调

参见例 86。

例 86：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中央 C 的回音处理



回音是一种非常普遍的自然现象，凭借我们的生活经验，也知道它是声音的延迟构成的回响，应该属于声音的卡农模仿。根据我们的一般经验，单独的声音，回声还是这个声音，音色的属性基本没变。但是你能想象单独的一个 C 音，它的回声却用和弦形式来表现吗？而且随着时间的延

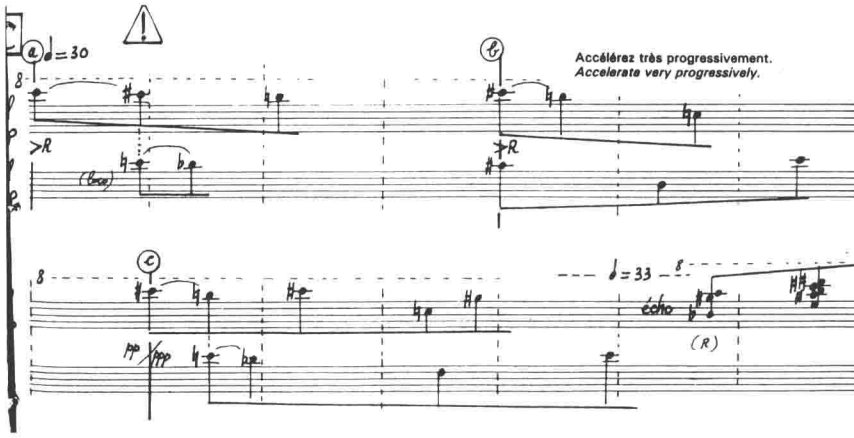
长，和弦变化得越来越不协和，以至于后面干脆把这个基音抽掉，有这样的回声吗？有！而且它是事实的存在。只不过由于我们人耳听觉的局限性，很难凭感觉鉴别出来，我们虽然能识别回声的一般属性，同时也感觉到了它的混浊，而且反射条件越好的环境，回声越混浊。详述请参阅第三章 3.3《Z 轴的参数》之（7）以声相作为 Z 轴信息的相关内容。

回声是有害的声音，它由不同方向、不同时差的有害反射声混合而成，模糊了基音的识别。作曲家正是利用了这个原理，在参考了钢琴 c^1 的频谱谐波分布离散图以后（参见尾注：钢琴 c^1 的频谱），虚拟地建构了例中的和弦结构，且根据频谱反映的时间过渡性特征，运用了越来越不协和的和弦连接，形象而本质地模拟了钢琴中央 C 的回声。

事实上，钢琴的频谱是不协和的，在高频部分存在失真。它实际上告诉了我们从协和向不协和过度的途径。多数乐器都有这个特点，打击乐更加明显。电声乐器通过技术的手段去还原这种属性，通常使用两种手段：模拟合成器：通过环形调制；数字合成器：通过频率调制。

以下再来看缪哈耶在钢琴作品《遗忘的土地》（*Territoires de l'oubli*）中的回声处理。

例 87：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的回声处理，总谱第 7 页



乐曲首先出现两条旋律溪流（自由模仿关系），到最后两个小节出现了回声。

按照缪哈耶的解释：

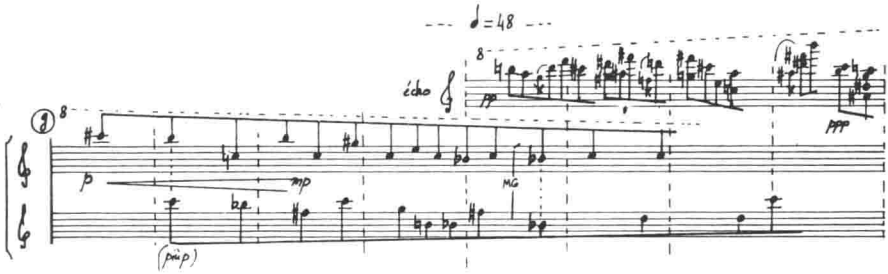
> 回声使用的目的，不是让观众听到相同音高材料的循环，而是忘掉先前的声音，尽可能的听到谐波产生的新音响（包括调制出来的声音），使我们尽可能地听到钢琴的共鸣，而不是调制，尽可能的使钢

琴演奏的声音不同，去演奏它们的共鸣音。[1]

这就是频谱规律的放大，相当于延长了时间。

下面是同一个作品第 9 页的例子，回声看得更为清楚。

例 88：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的回声处理，总谱第 9 页



缪哈耶解释道：

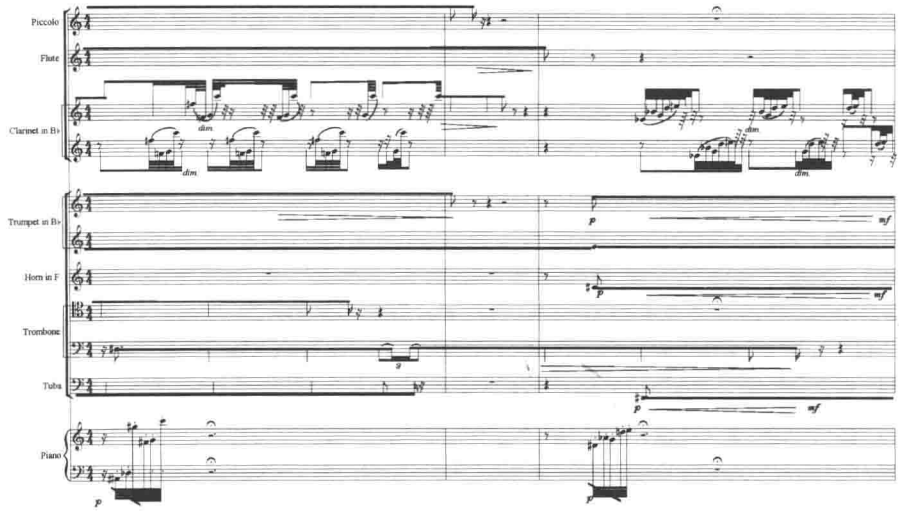
> 两条旋律溪流自上而下，倾泻而至，而后是由高频谱波组成的回声（谱中标 *echo* 处是两条溪流共同的回声），自下而上，攀岩上升。为了刻画回声逐渐混浊的效果，和弦音处理是逐渐增多（加法），节奏根据时间过渡性作递减处理。重复是一种滤波处理，高音谱波有的已经作了八度调整，为的是便于演奏。[2]

可见模仿的含义仅存于意义上，谱面的表象已经区别于传统。

既然回声能构成模仿复调，不难想象，混响、延迟同样能构成模仿复调。由于混响的反射声是有用反射声，因而在处理上应该比回声的效果要协和一些。

下面是后频谱作曲家马克·安德烈·达勒巴维在其早期作品中，通过两只单簧管作为钢琴的有用反射声造成的回声。

例 89：马克·安德烈·达勒巴维《天堂机械》（*Les Paradis Mecaniques*）[3]

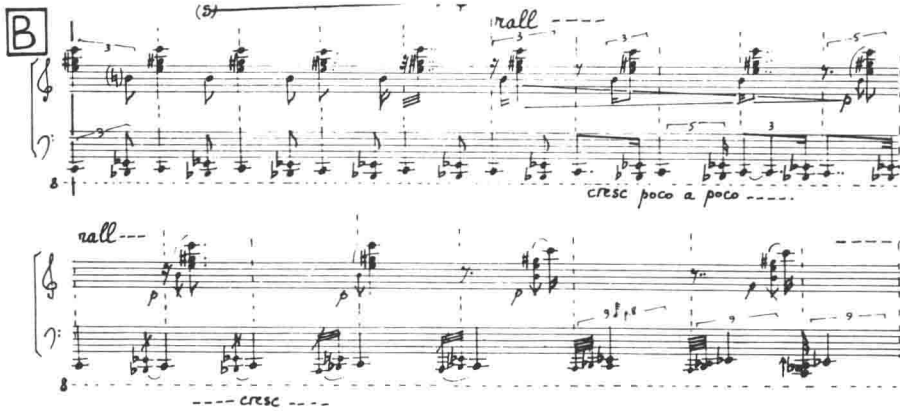


(Editions Jobert, Paris)

作品先由钢琴触发一个音型，而后由两只单簧管先后做回声处理，相互间的时间间隔非常短，这里的回声旋律线非常清晰，过滤掉了“多余的泛音”，更没有使用柱式和弦结构，可以理解成有用反射声构成的混响。整个铜管做模糊背景的作用。

8.2 由共鸣构成的支声复调

例 90：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的共鸣处理，总谱第 4 页

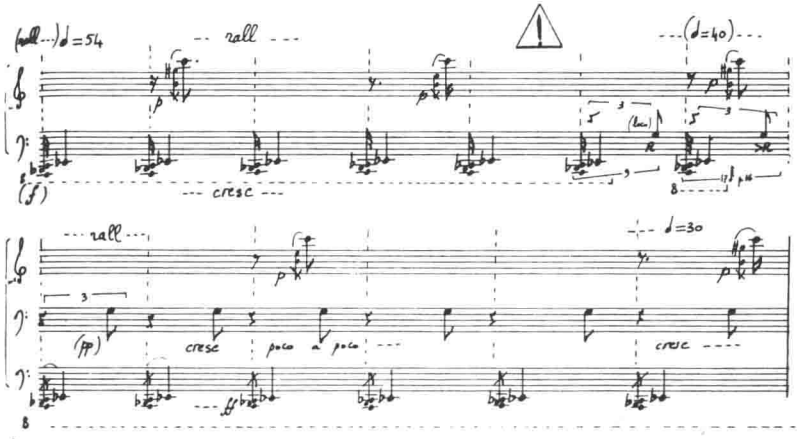


上例中前四小节为完全同步的柱式和弦，我们可以把它们整体看为“加厚的带状旋律”，左右手的音域跨度很大，它们的和弦音高皆为 G 音的谐波音，只是关系远近而已（由 5、17、19、27、43、51 号谐波构成），而

后左右手的和弦音高保持固定，节奏进行分化加密，形成两条各自独立的旋律线。在第二行，左手使用多重倚音装饰，增加了 G 音的第 9 号谐波音 A 音，同时左右手拉疏节奏。鉴于上面的谱例处于同一个谐波系列的事实，旋律线由同步变为异步的结果类似于传统复调的支声性质，故而称为“共鸣式支声复调”。

例 91 紧接上面谱例。

例 91：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的共鸣处理，总谱第 5 页



高低音和弦继续拉疏，速度放慢（由每分钟 54 变为每分钟 46），进而出现基音 G，此时 G 音出现得非常自然，众望所归，形成极佳的共鸣效果。

上面两个例子合起来是一个完整的频谱阶段，反映了频谱音乐的曲式属性。

这两个例子构成的声部关系是模仿复调？还是对比复调？还是都不是？这是仁者见仁、智者见智的看法。事实上，还可以把它看为一个 G 音的逆向生成过程。它体现了时间过渡性的结构含义。

8.3 由循环构成的复调

循环（loop）技术在简约派音乐中使用得最为显著，在频谱音乐中也多有使用。按照缪哈耶的话说：“使用循环就是在使用有序和无序的侵蚀，通过循环来模糊声音的属性，使其从乐音向噪音过渡。它比较适合一秒钟一次到三次的循环周期。有时快，有时慢。”④

为了便于形象地理解循环，我们暂时把音乐内容放放，先来看动画艺术是如何使用循环技术。我们知道动画与别的影视艺术一样，主要是利用

时间轴，并在时间轴上分配帧的转换次数，最常见的是每秒 24 帧、29 帧或 30 帧来形成动画的连续播放。下面我们假设有卡通图：

现在要把它做成持续一秒钟的连动画面，应该怎么办？

（以 30 帧/每秒为准）

a. 最简单的做法是：把这个图复制 30 帧，而后连播，但我们得到的是静止画面。

b. 最麻烦的做法是：画 30 帧行动连续、形状有异的画，连播可得动画。但这种方法太费工费时，属于手工作坊式模式，成本巨大，不好修改。

c. 最智慧的做法是：只用上面一帧画，在时间轴上做文章。把时间轴理解为多层、多重分布，即多维时间。

首先确定一个一维时间轴 X，它是绝对时间轴。

第二设定一个相对时间轴 Y，它专门记录这帧画的时间入口到这帧画的时间末端的过程，而后自动再指向入口，形成循环无终时间。

第三设定一个效果时间轴 Z，动画效果是多种多样，在此，我们做一种效果，假设以原始图画的垂直中线为中轴，由左向右，由里向外，顺时针方向旋转，以每一度取一帧的采样率来规定效果时间轴的变化参数。我们综合运用 X－Y－Z 三维时间轴就能得到具有生命力的可动动画。

上述设定的绝对时间、相对时间都好理解，最难的是效果时间轴，它是智慧最高的模块，只要把这些模块提前预制好，储存于电脑中，我们就能一劳永逸地享受后期不尽的愉快！而且可以任意修改。这正是当下大量动画软件给我们带来的惊爆实惠。画一帧画联上一个效果命令，就能看到生灵活现的动画。

以上的动漫转换联想就可以成为一幅三维织体的音乐图画，其中的一条旋律是绝对时间，第二条旋律是由相对时间构成的循环，第三条旋律是由效果时间构成的循环。只要绝对时间一直在进行，相对时间与效果时间旋律就会无终地循环下去。当然，我们还可以加入，第 N 条效果旋律，使其构成更加复杂的多重复调。

抓住了时间轴，就抓住了问题的关键，尽管动画的现实表象多种多样，不胜枚举，但它们的本质就是多重时间轴的显现。电影中的蒙太奇，美术中的焦距变化，音乐作品的曲式布局无不体现多重时间的控制原理。

正如网页制作中的一句行话："在网页中用一个时间轴控制所有动作不如用多个时间轴分别控制网页的不同部分简单。"

早期频谱音乐过分强调声音的"自身历史性"，一切参数都要来源于基音的"自我繁殖"，使其曲式意义的时间轴——时间过渡性特征陷入了"单维参数"的陷阱，最终使得曲式呈示较为单调化，没有反映出曲式内涵的全部意义。事实上，从80年代后期开始，格瑞瑟与缪哈耶就开始离开了早期严格的"频谱理论"，到90年代反映得更加显著，他们转而更加关心"中断"与"不可预知性的曲式"，更加强调"线条、复调的写作技术"。其中一个重要的理论贡献就是对时间的延时性和连续性的认识成果。甚至，可以这么说，时间的多维认识，使不太完善的早期频谱理论得到了"自我修缮"，从而促成了"后频谱音乐"的转型。对此，格瑞瑟是认同的，他于1996年1月18日在美国洛杉矶出席他的作品音乐会的时候，曾经与音乐家大卫·布顿尔（David Bündler）作了一次谈话，对自己的美学观及创作观点做了解释，他说：

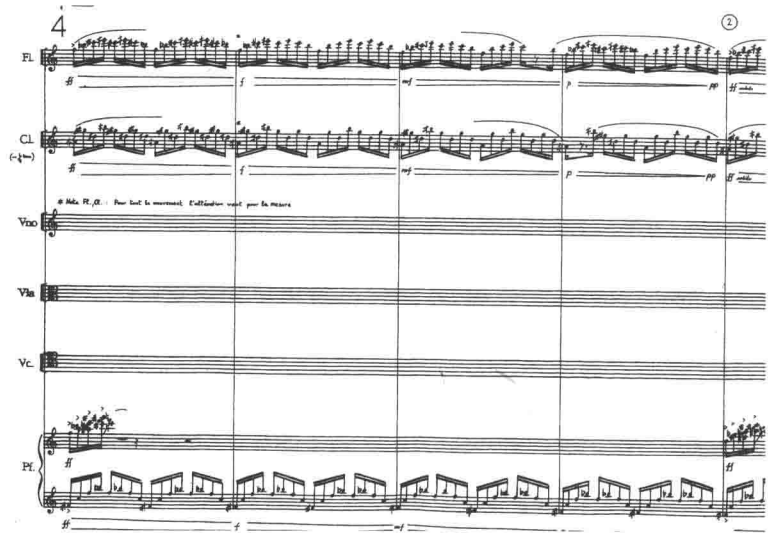
> 我探索时间的延伸和连续性使我成名。作曲家如何去延伸时间呢？什么是时间延续的代码呢？这是频谱主义真正的起点。[5]

对于时间的延伸，他做了进一步的解释：

> 我有必要解释一下"时间延伸"这个词，它不单是指长度和持续的意义。如果你要去延伸时间，你要从各个方向（维度）去扩充，纵向、横向和深度延伸。因此它与长短的概念是不同的，也不同于其它一切事物。时间的延伸迫使我们要去认识各种各样的频谱，从而使我们进入到一种微观的时间间隔之中，我们从来都没有注意过的微观世界。存在于24调十二音以外的微分音世界，这是我们塑造自然（生态）声音的必须基础。[6]

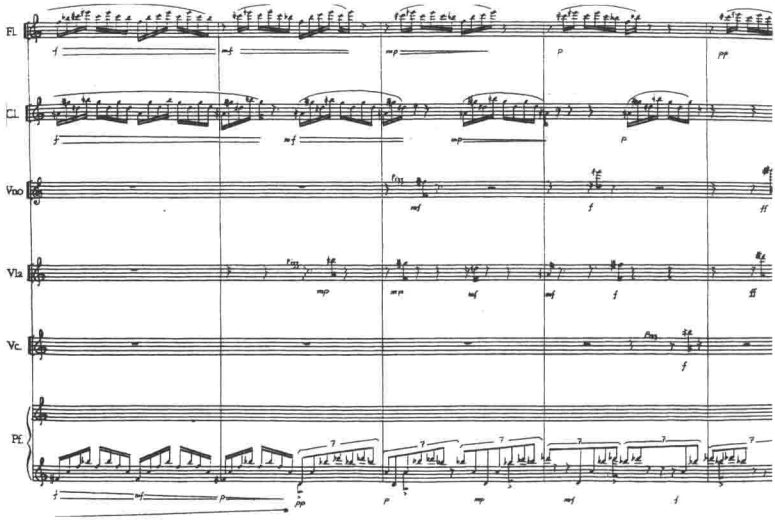
格瑞瑟以时间为研究对象，一直贯穿于他的作品创作全过程，尤其以他的晚期作品最为显著。其中对循环（loop）的运用成为他的技术手段的重要特征。在室内乐作品《时间的漩涡I、II、III》中，作曲家对不同维度的时间的延伸与压缩作了探索。下面参见《时间的漩涡I》第一页的总谱：

例92：格瑞瑟《时间的漩涡I》Loop运用，总谱第1页



从谱例上可以看出，作曲家在长笛、单簧管和钢琴声部设计了相同时间长度的“模”（都以两个节拍单位，八个十六分音符为一标准帧），而后循环（loop）。注意连线断句划分，相同时间长度的“模”在循环过程中逐渐分离，各自按照不同的时间长度分句，做减法、稀释、淡化处理，使其织体声部线条逐渐从同步的带状旋律分离成各自独立的“对比复调”。参见例 93。

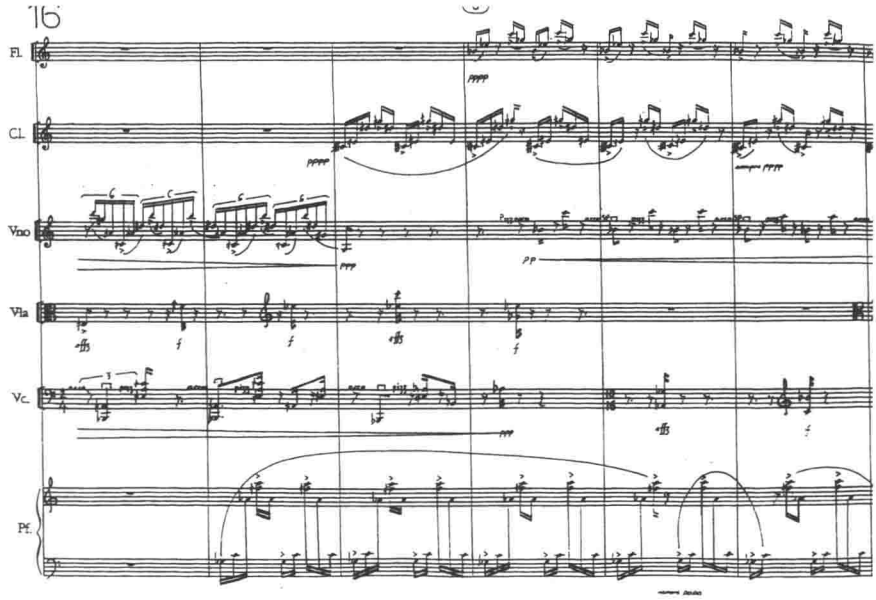
例 93：格瑞瑟《时间的漩涡 III》Loop 分离，总谱第 84 页



两年以后，他创作的《时间的漩涡 III》也使用这种技法（即第三乐章以“再现”第一乐章开始，而且是音高、织体都没变的“静止再现”），只是随后加速了织体线条的分离过程，使得织体结构从同步的循环向异步的多重循环发展，进程更加显著。参见例 94。

可见谱面已经由同步“齐奏”分离成了“多线条”的对比复调，各声部的异步性已经开始显现。再看例 94。

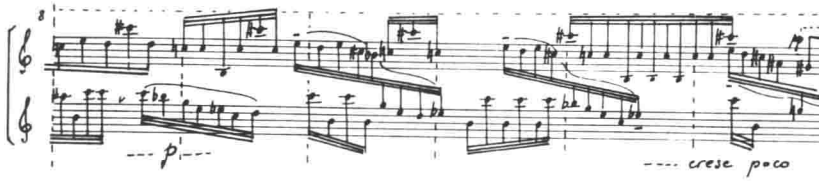
例 94：格瑞瑟《时间的漩涡 III》Loop，总谱第 92 页



分离的结果使得长笛、单簧管、小提琴、钢琴形成各自新的“模”，再稀释循环。中提琴、大提琴稀释成“点状支持”的点结构。各自声部的独立性进一步加强，对比复调因素也同时得到提升，但是声部的整体形态仍然没有摆脱“带状的痕迹”，所以模仿性也不言而喻。

缪哈耶在钢琴作品《遗忘的土地》中也做了类似的循环技术运用，下面从谱例中截取了三次不一样的循环技术运用。

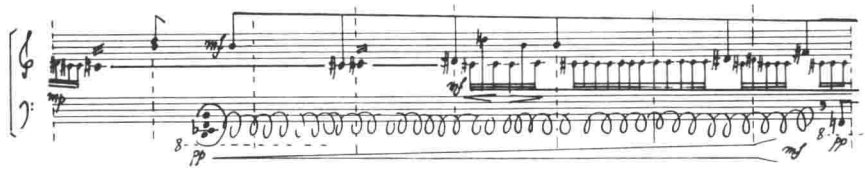
例 95：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的循环处理 A，总谱第 26 页



这里与格瑞瑟相似的地方在于：三个层次都是等节奏（都以三十二分音符为最小单位），不同的是旋律的发展方向与分句的长短不一样。另外，各声部的“模结构”在循环中做了局部的改变，长度也做了相应的加、减法调整。可以看出其循环处理要较格瑞瑟自由一些。

再来看缪哈耶在本作品第 30 页的一次循环处理：

例 96：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的循环处理 B，总谱第 30 页



这让我们想起上面说的动画例子，相当于是动画的音乐呈现。

右手最上方声部表现的是——绝对时间轴旋律。

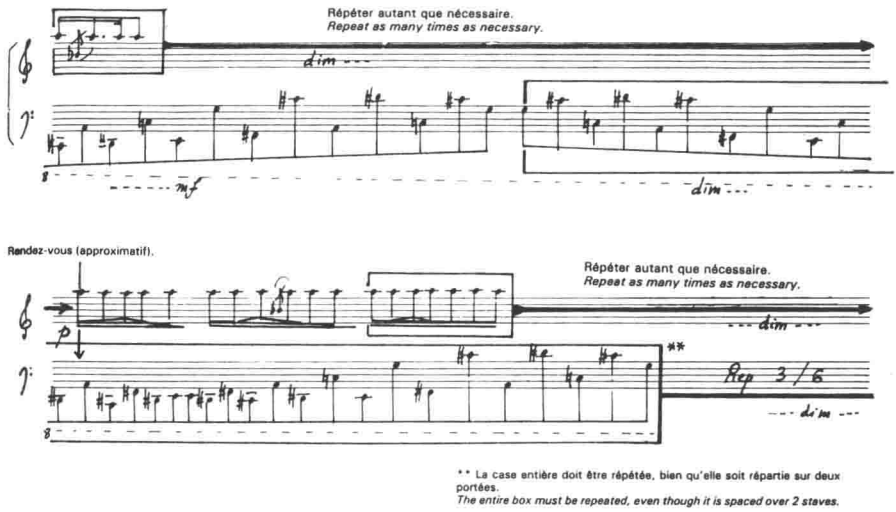
右手内声部表现的是——相对时间轴旋律，具有循环性，是变异的循环。

左手低音声部表现的是——循环效果旋律。

音响效果达到了缪哈耶要求的：由乐音向噪音过渡的目的。

再让我们来看看缪哈耶在本作品较前一次的循环处理。

例 97：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的循环处理 C，总谱第 13 页

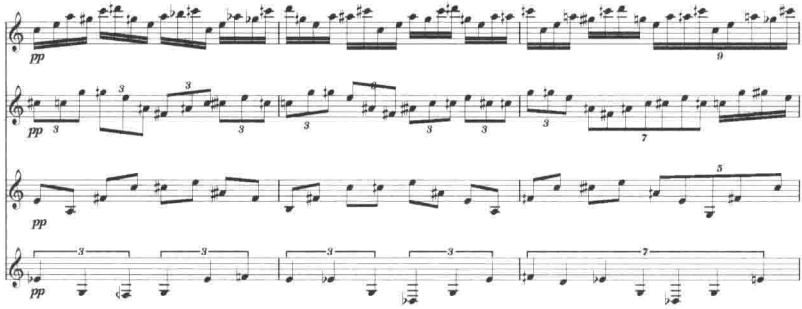


这要相对简单、清晰一些，左右手先后以不同时值长度做循环，其中伴有力度和速度的微妙变化，增强了音乐的动感，每一个方框内的音符为一次循环的“模结构”。

循环技术不仅得到第一代频谱音乐作曲家的推崇，还得到后频谱音乐作曲家的喜爱。卡尔嘉·萨瑞拉禾、菲利普·宇海勒、马克·安德烈·达勒巴维在他们的作品中发扬光大了这种技术手段。这与他们所崇尚的音乐

美学观念有极大的关系。他们吸收了“后现代主义”的一些思想观念，不再回避序列、集合，乃至历史上存在的一切文明成果。冲破布莱兹整体序列主义、数字理性铁桶般的禁锢。同时也对早期频谱音乐理论进行了反思。后频谱音乐作曲家都强调听众的记忆与参与意识，因而重复、变奏、结构再现、结构平衡等传统手法又被广为运用。

例 98：菲利普·宇海勒《形象》[7]的复调处理，总谱第 5 页



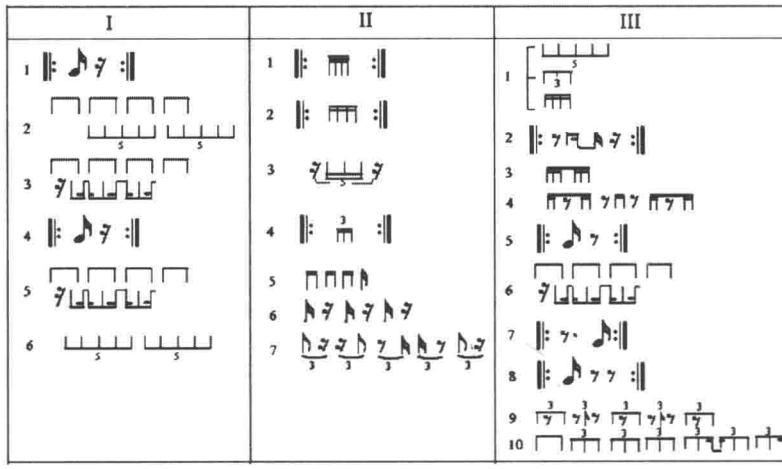
(Gerard Billaudot Editeur, Paris)

上例出现的木管四声部复调，各声部运用固定的节奏细胞，按 4∶3∶2∶1.5 的比值，形成对比性的节奏复调，就好像四条不同频率、不同相位的正弦波在做相互干涉作用。谱例中声部音区的交叉、超越是干涉作用的最好证明。由于旋律外形的相似性（都为正弦呈示），因而它们之间又具有模仿性。各声部间以自己的节奏步伐做循环（loop）。

综上所述，这个谱例微观分析是对比复调，宏观观察是模仿复调，同时具有对比、模仿二重性是谱例的最大特点。

运用节奏循环来构成复调织体，刻画回声与延时混响效果。这种技法，到后频谱音乐作曲家马克·安德烈·达勒巴维身上发展得更加极致。为了增强作品的记忆性、本真性，他重归表现，甚至于充分吸收美国简约派的技法。在 1991 年创作的作品《斯珂勒》（*Scuils*）中，在作品的第一、第二、第七乐章中，大量使用节奏循环技术。下面是作曲家在这三个乐章中，预制的节奏循环模式。这种技术加上他浓墨重彩的管弦乐配置，使其得到了一种极具个性的音响化语言，并且成为了他作品的标签。

例 99：马克·安德烈·达勒巴维（Marc-Andre Dalbavie）在《斯珂勒》（*Scuils* I、II）和 VII 乐章中的回声节奏设计[8]



达米安·普塞特（Damien Pousset）解释道：

> 作品以叠置方式开始，各自按照自身的步调动力循环…… 马克·安德烈·达勒巴维把它们放置在一个相对固定空间里面，各自使用不同的速度、不同的时间长度循环，产生回声……不同的模一起建立起了一个整体的动力曲线（好像滴滴溪水，汇成江河，奔腾呼啸），各自具有不同的清晰度（交叉衰落、裂缝、断绝等等），形成一种复调整体。[9]

这些原理的基础就是节奏、速度的各自独立，有了个体的独立、自制，才有整体的和谐统一。

这种技法的一个关键技术参数就是，清晰度，它的处理（混浊与明晰的变化）直接关系整个作品的成败。

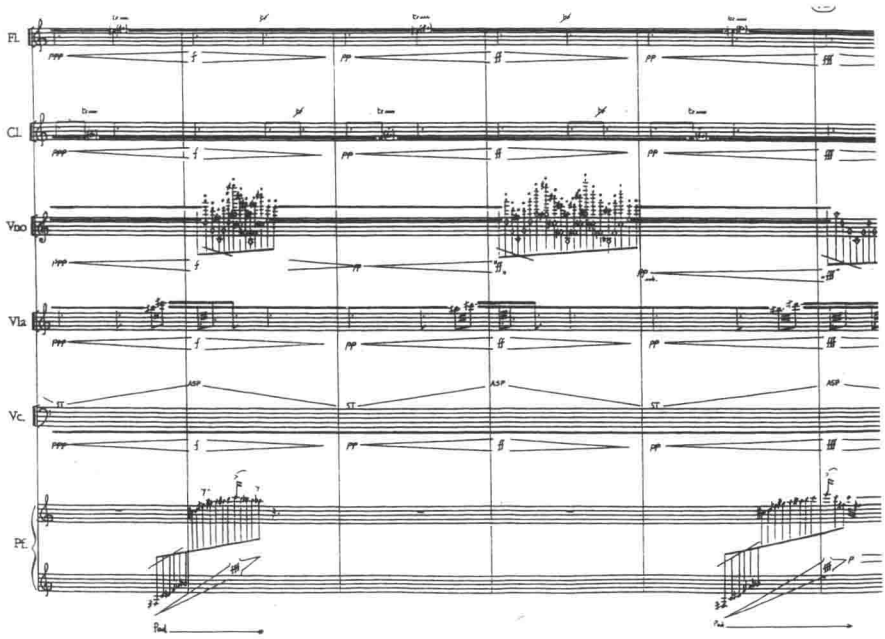
8.4 音色复调

传统复调的两个因素，一个是节奏异步，另一个是音高独立。只有到了勋伯格提倡的音色旋律以后，音色的意义才越来越显得突出。频谱音乐本质上说，还是属于音色音乐。而且他们对音色的追求更加极限化、微分化。这正是他们对世界音乐的主要贡献之一。对音色的强调也是现代及当代音乐的共同特征。

广义地说，由两个（或两个以上）不同音色的乐器，构成的音乐就已

经存在音色复调了。哪怕它们是在齐奏一条旋律，因为音色的各自独立性已经确保了两个旋律的分离。这也正是现代音乐，尤其是现代室内乐喜欢使用独奏乐器的主要原因——各声部独立。

例 100：格瑞瑟《时间的漩涡 III》，总谱第 116 页



木管与钢琴的音色各异已无须说明。在此，需特别提醒弦乐组乐器，由于它们属于同质乐器，音色非常接近，如果按照一般的共用演奏法，它们极易融合在一起。为了增强各自声部的独立性，作曲家在弦乐组中，各自使用不同的演奏法，小提琴用泛音奏法，中提琴用指颤音，大提琴用弓在琴马—指板之间来回循环往复，分离、强化了各自音色的独立性，最终使得整个织体成为色彩鲜明的音色复调。按照传统的观念，长笛、单簧管、大提琴演奏的都是长音持续，而且力度的走势也完全同步。但作曲家有意让两支木管做了节奏的分离，更重要的是，大提琴的弓弦触点的变化，改变了弦振动的泛音分布，使得琴的音色一直处于变化之中。作曲家这样处理的目的就是为了音色分离。详情请参看频谱音乐的旋律形态的相关内容。

8.5 化横为纵的复调

翻看现代或现代以后的音乐作品总谱，映入眼帘的多为一些“杂乱无

章”的织体形式，表面看起来非常繁琐，声部之间的交叉，乃至“麻花绞”式的旋律大量存在。事实上，这只是一个外部表象而已，我们不要被它们麻痹，只要稍加仔细地去伪存真，就能理出它们真正的本质，其实，并不复杂。化横为纵、合纵为横是经常使用的手法之一。

谱例参看第六章《频谱音乐的旋律形态》之6.7《合纵旋律》例70。

从谱例上半部（a）中可以看出，弦乐组的每一个声部都已成为独立的旋律线，节奏的异步，相位的时差，音高的相对独立，使其成为了复调织体（微观成对比，宏观成模仿关系）。

把（a）的织体作X轴横向投影，可以得到（b）的合成旋律，而且是条单旋律。可见原来弦乐组的织体是通过单旋律的节奏分离，采用附加共鸣、影子和声的方法构成的。这种织体形式自梅西安、鲁托斯拉夫斯基以后就深得现代作曲家的推崇。频谱音乐作曲家继承了这一技法，同时把它做了更加细微的分解，使其融入频繁变化的织体结构中。也就是说，极度强调小对比、大统一，尽量避免连成一片的“简单模式重复”。

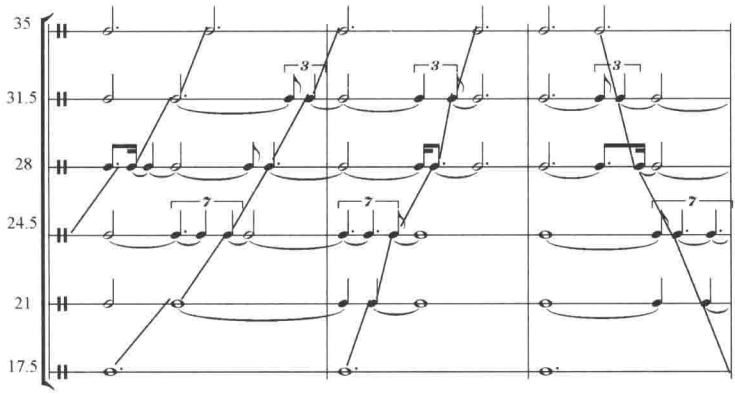
8.6 速率复调

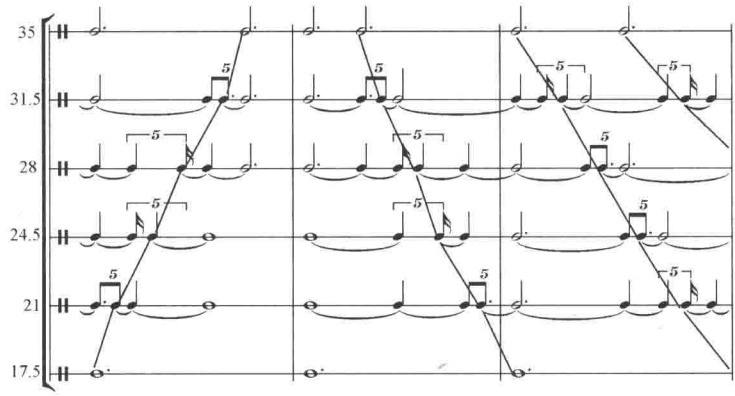
速度是音乐结构力的基本元素，它的通常表现形式是节拍、节奏，即通过一定的节奏型组织来记录速度。本质上就是记录每一分钟有多少个单位拍，即单位时间内的发音点数。

前面介绍的五种复调形式无不涉及速率的问题，只是在这一节里把这个问题单独提出来，作为一种独立的复调形式。这叫做换一个眼光，海阔天空；易一个角度，前途似锦。

美国作曲家卡特是最先提出、并运用速率概念的作曲家，速率的转换、对比、对位是其作品的重要特征。他在创作双重协奏曲的时候设计了下面一种速率对比复调，参见例101。

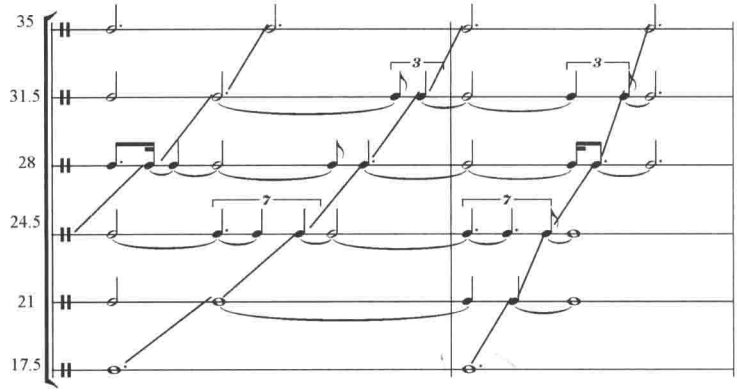
例101：卡特《双重协奏曲》（*Double Concerto*）第44—46小节的速率节奏设计[10]



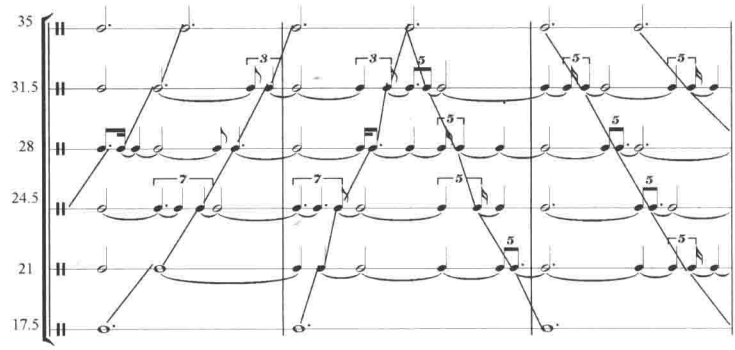


谱中35、31.5、28、24.5、21、17.5表示各声部中每分钟单位拍的数目，各自声部用不同的速度，已经确保了对比复调的存在。但是仔细分析如44—45小节的上半部分，会发现各声部的发音点为4∶4∶4∶3∶3∶2，它们构成了一种同进异步，绝对向量（长度）一样，步伐不同的织体形式。事实上，这与传统的等量复调[11]具有渊源关系。声部之间的模仿性也不言自明。在此，各声部演奏什么音已经无关紧要了。这样的织体结构在现代与现代后的音乐作品中广为运用。如果我们把上方织体的上下两个部分作一个重组，还可以得到下面的变异织体结构：

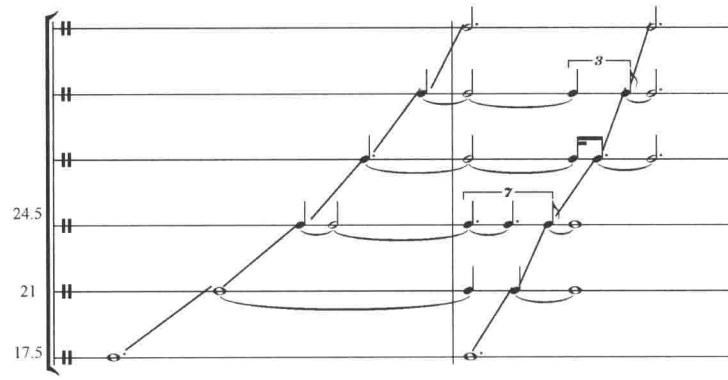
（1）同进同出型速率复调



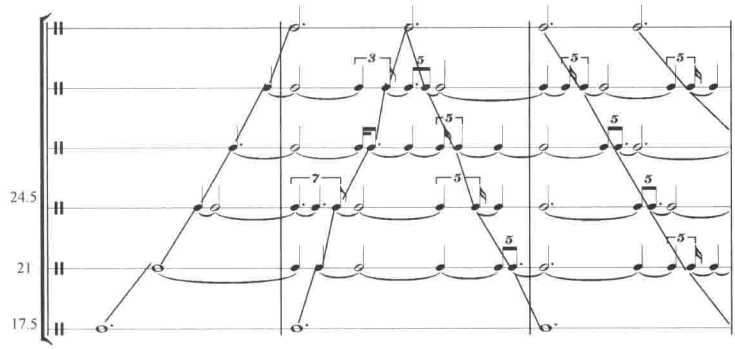
（2）同进异出型速率复调



（3）异进同出型速率复调



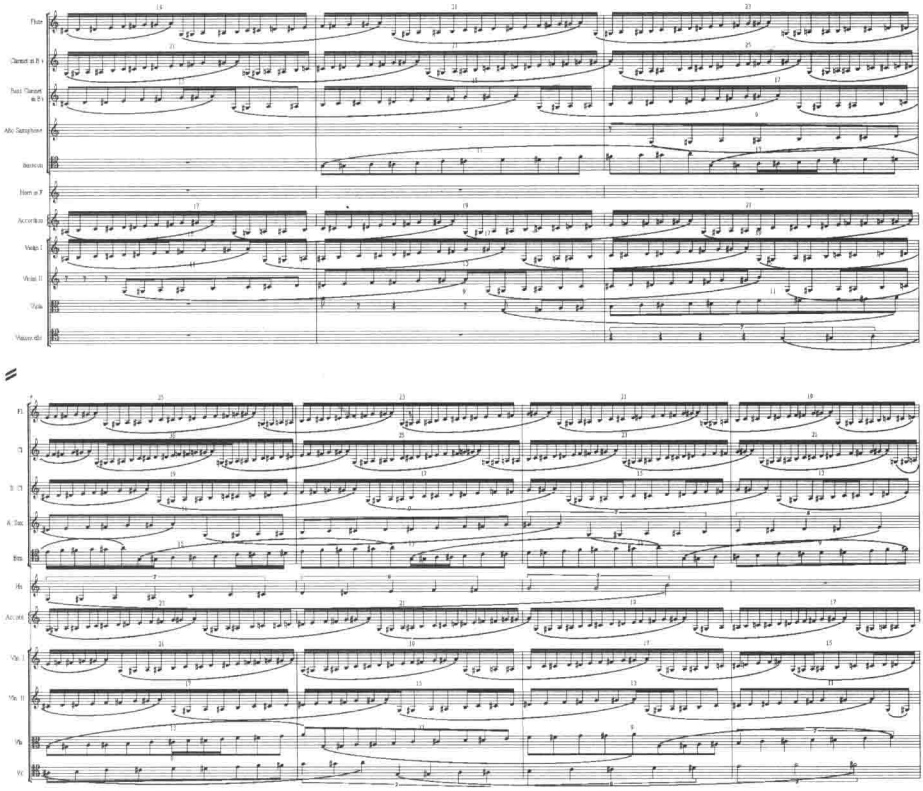
（4）异进异出型速率复调



这种复调形式最重要的一点就是要明确各声部的速度比率及它们共有的最小共倍数的关系，这样才能做到有理有节地控制其发展趋势。

格瑞瑟于1972—1974年赢得助学金去罗马研究，被授予居住罗马梅第奇别墅（Villa Medici in Rome，1972—1974），这期间他创作了一部重要的管弦乐作品《起源》（*Derives*，1973—1974）。在作品总谱第26页（排练号29），出现了下面的速率对比复调织体。

例102：格瑞瑟《起源》，总谱第26页



每一个声部都是独立的线条，各旋律发展的方向和走势都是一样的，不同的是它们的分句——模结构的长度。本质上就是单位时间内的发音点不一样。对照谱例中，被红线卷出的 A、B 部分，很容易看出结果。这事实上，就是速率复调。当然，我们还可以用一种电声学知识来解释这种复调织体。

这种表面看上去复杂的织体结构，其本质是直达声与众多相位不同、延时不同的反射声共同组织起来的音响图画，因此，这个复调织体又具有模仿性。为什么可以这样说呢？因为在电子音乐发展过程中，曾经出现过这样一种装置设备：在一个与磁带一样宽的圆柱体上按照一定的度数关系，安上一个录音磁头及另外十一个读音磁头，当磁带走到录音磁头处，记录下声音触发器的声音信号；磁带继续往前走，分别经过第一、第二……第十一个读音磁头，它们先后把磁带信号传送到功放器，再被送入扬声器播出来，就构成了十一个声部的混响延时音响。如果十一个读音磁头的间距是一样的，磁带又是匀速运动，那么十一个声部是等距离卡农复调。如果间距不同，或者磁带做非匀速运动，那么十一个声部可能是密接和应。如果在十一个读音磁头分别加装不同效果的滤波器，把音高、强度、时值、音色等参数做线性或非线性改变，失真、扭曲夸张，那么最终的音响效果会多么丰富……而且这样的磁头和滤波器还可以加装下去，音响的效果会达到无以复加、难以想象的复杂程度。

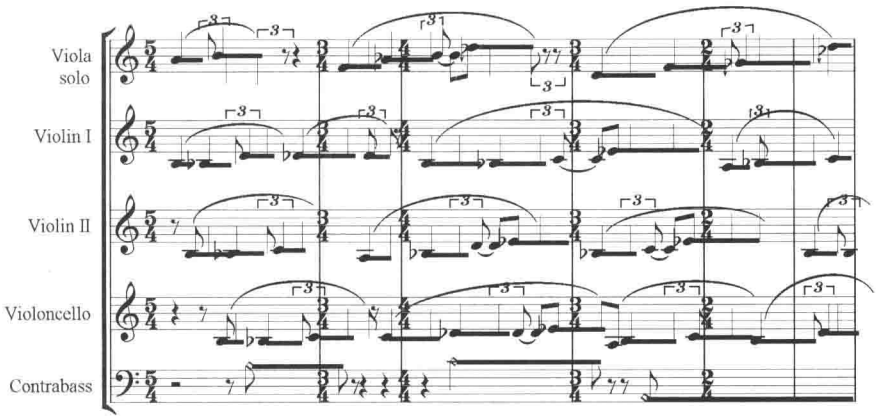
所以我们不应该被乐谱的表面无序、杂乱无章冲昏头脑，而要去伪存真，追本溯源，找到真正的本质因素，可能它一点都不复杂。

本例各声部的发音点数速率对比关系请参见第十一章频谱音乐的配器原则 11.3.3 节奏分离、发音点错位造成的模糊例 147 格瑞瑟作品《起源》各声部节奏发音点数统计图。

再让我们来看一个简单一点的例子：

马克·安德烈·达勒巴维在 1986 年为频谱“路线探索”室内乐队创作的大型室内乐作品《王冠》(*Diademes*)[12]中的速率设计。

例 103：马克·安德烈·达勒巴维《王冠》(*Diademes*) 总谱第 9 页的弦乐组部分



(Editions Jobert-Paris)

从谱中可以看出，先由中提琴独奏一个旋律，它就好似声音触发器。整个弦乐组成为中提琴的共鸣箱，成为反射声，做延时混响，其间有的声部在繁化，有的在简化处理。弦乐组基本上是在做“匀速延时”混响作用，它们像“影子”一样紧贴中提琴的声音形象。

8.7 多维复调

维是指一种空间概念，简单地说，N 维就是 N 条直线两两垂直所形成的空间。逻辑上的同畴、同胚、相交、相异是它的本质。比如波形分析中的载波—调整波—合成波；和弦一章讲到的倍频—旁频—间谐波和弦；循环中介绍的绝对—相对—效果时间轴；旋律形态中介绍的不同种类旋律的同时运用；电影艺术中的蒙太奇；美术中的焦距转换等，它们都可以构成多维结构，作用于音乐就是多重复调织体。

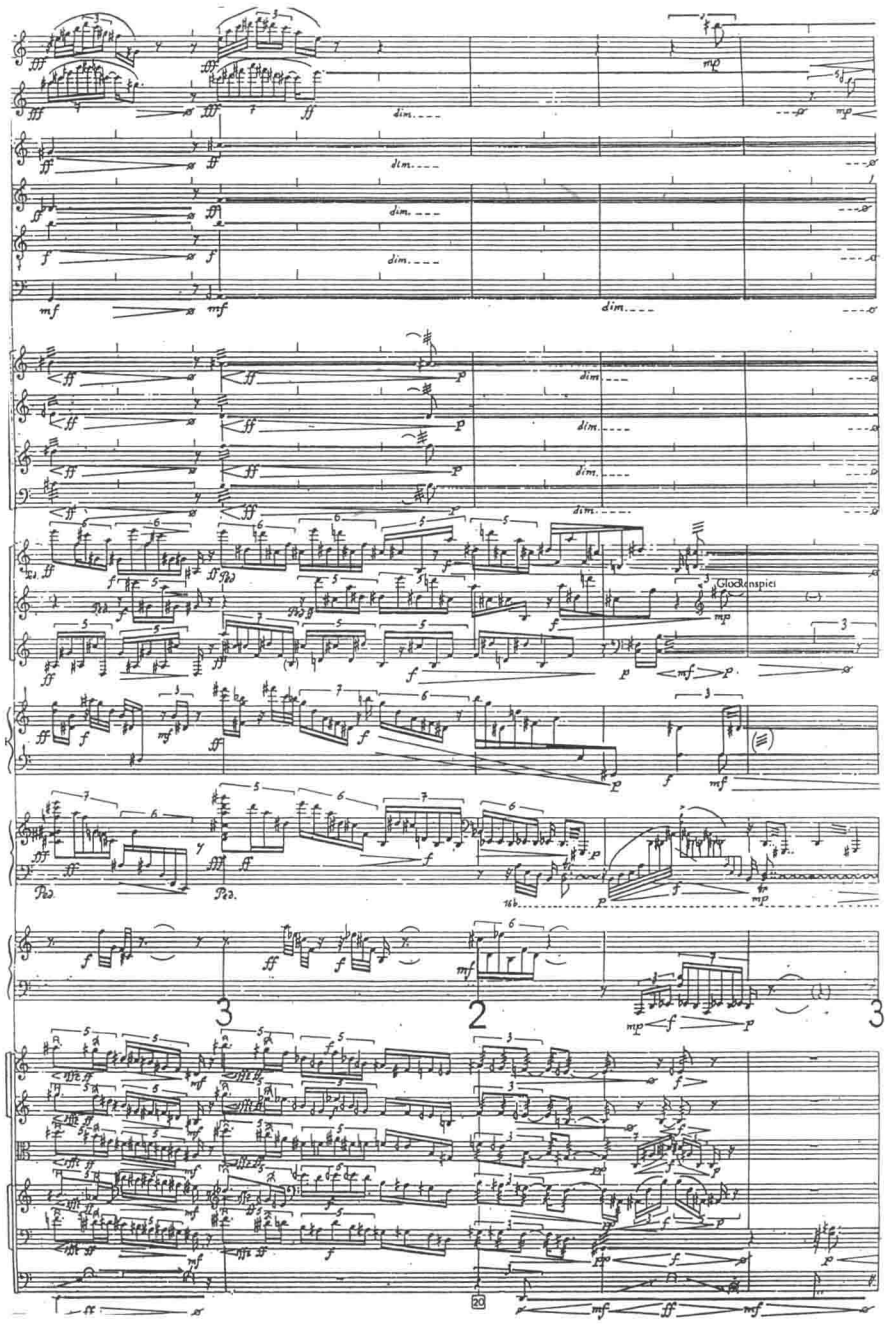
音响艺术本身就是多维的，只是它们的乐谱表现形式是平面的，我们不应该被这表面形式所蒙蔽，而要透过表面感觉到它的立体时空存在。这是一位艺术家必须具备的基本素质。

事实上，音乐发展自进入现代开始，先锋派作曲家们抛弃了传统的音乐价值，追求艺术表现的绝对自由，因而他们音乐的那种深奥玄秘的特点，使绝大多数音乐爱好者为之瞠目。这是音乐史上的新现象。尽管已经进入了个性化写作时期，没有共性写作时期那样放之四海而皆准的普遍标准，没有一种统一的风格，也没有几种占统治地位的风格，音乐表现形式千姿百态。但是，有一个特点是所有现代与现代后音乐作品所共有的属性——作品的高容量信息及复调的偏爱。即单位时空以内的信息含量之多

超过了历史上任何一个时期。

以下来看看缪哈耶在 1992 年创作的大型室内乐作品《瑟弘迪》（*Serendib*）的多维复调处理。

例 104：缪哈耶《瑟弘迪》（音乐会版），总谱第 12 页



粗略分析下乐谱，就能发现它由下列几种因素组成：

(1) 一对平行旋律：picclo+fl. 木管高音（前景 II）

(2) 长音持续背景：Ob+Cl+Cl. B. 木管高中低全域

(3) 长音颤奏背景：Horn+Trp. +Trb. 铜管组

(4) 麻花式旋律：Perc. I+SynthII+Piano+Harpe

整个打击乐组加合成器与

钢琴竖琴构成主要前景 I

(5) 带状中景旋律：Vl. I. II+Vla+Vc+Cb

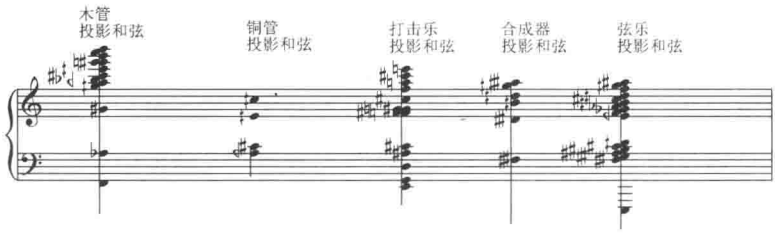
整个弦乐组构成中景带状旋律

可见旋律形态各不一样，它完全废除了传统织体构成因素的原形覆盖功能，如果说还存在有覆盖、支持、点绘功能，已经加入了强烈的干涉作用，使得整体音响变得更加模糊。

上述因素的划分还有更加重要的依据。

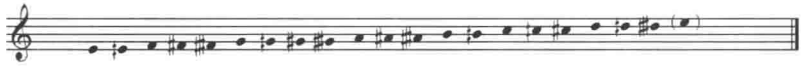
先让我们以这页总谱的第一小节做一个取样分析，按照组的划分做纵向和弦投影，小节内所有的音都全部提取。注意：第二单簧管调低了四分之一音（降 B 调），合成器调高了四分之一音。下面谱例的音高都已经按照实际音高做了移位。

例 105：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页第 1 小节和弦投影分析



可见和弦音组织得相当复杂，所有音名都有微分记谱。为了便于对照，把上述所有音，按照传统音名关系作八度调整，可以得到下列二十音音列。

例 106：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页第 1 小节所使用的音列表



仔细对照上述三例，解答下列问题：

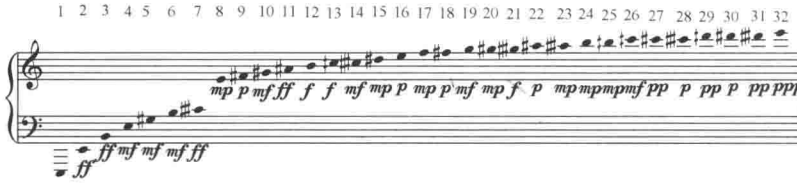
(1) 谁是这一小节的基音？

(2) 基音的倍频音是哪些音？旁频音是哪些？间谐波音是哪些？和弦的组成及分组有什么特征？目的是什么？

从谱例中不难看出，低音贝司演奏的 E_1 是这个小节的基音，而后由钢琴下行分解和弦至 E 做了八度强调。木管、铜管都有意回避这个音，打击乐组也只是颤音琴在 e^3 做了起句始音，各组演奏的主要是这个音的泛音和失真泛音，而且尽量不重叠使用同音高的音。

在此，我们用理论推理先把 E_1 的前三十二号泛音表列出。

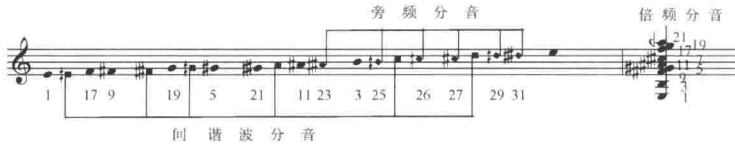
例 107：E_1 的前三十二号泛音表



我们以泛音与基音的距离（远近）关系来规定倍频、旁频、间谐波的界限。

假设 21 号以前的泛音为倍频，22—32 号泛音为旁频，32 号以后的泛音为间谐波，我们可以把本小节出现的全部音高作出分类。参见例 108。

例 108：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页第 1 小节所使用的二十音音列分类



没有符杆：倍频音高；符杆向上：旁频音高；符杆向下：间谐波音高

用本例与例 105 分组和弦投影对照可以得到如下结论：

（1）倍频、旁频、间谐波被混合运用于每组分解和弦中，（好在是分解运用，如果是柱式和弦，五组一起上，其和声密度将超过历史上任何时期的任何流派音乐作品）。

（2）这里的真正目的是追求模糊（相关原则参看配器内容）。

（3）在模糊中求独立。各组在音高、音区划分上尽量分离，只有合成器是对弦乐组起覆盖支持作用（仅升 $\frac{3}{4}$ A 一个音与弦乐组不同），其余各组旋幅带宽、音域、密度、音高都力求唯一。即便出现同音名音也作微分调整，少量音出现的重复是为了强调。要特别注意铜管组出现的四音和弦，尽管音区处于中央，不占先机，由里到外被包裹得严严实实。但它们仍然如脊骨一样凸现而出，巍然屹立。这一个方面得益于铜管自身音色的先天优势，更重要的一点，它透露出作曲家的艺术观点与技术精髓。那就

是模糊中的清晰原则。没有让音响陷入为浊而浊、为清而清的极端，很好地平衡了两者的关系。作曲家精心地把四个音均分为两半，两个去支持基础（降$\frac{1}{4}$A—升C在弦乐与打击乐组出现过的音），两个凸现唯一（升$\frac{1}{4}$C—升$\frac{1}{4}$E，只在铜管出现）。

或许有人会产生疑问：为什么不把合成器与弦乐组和弦看成倍频和弦呢？而把打击乐、木管、铜管组和弦看作旁频及间谐波和弦呢？这完全可以！因为它们的划分本来就是相对的，上面的分配是一种虚拟的理论分配，实际乐器的谐波分布是与理论有出入的，它们会存在谐波失真现象，而且这种失真被人们习惯地感觉为准确、正常；而把准确、正常的理论划分音高，理解为不正常、不准确。参见声音合成相关内容。在这里，这个E_1基音，到底是以什么乐器为准，它的实验泛音怎样，这只有作曲家知道。事实上，这个问题已经不重要了，重要的是这样写作的结果告诉了我们一个事实：作曲家已经同时运用了倍频、旁频、间谐波和弦来作为声音的可塑基本素材，强化了谐波与失真；模糊与清晰；协和与不协和；身体与影子的辩证作用关系；使音乐作品的内在本质与外在形式都呈现了多维复调特征。

上述一个小节的原理透射出整个作品的主要特征，此技术于作品多处使用，在此不再赘述。

8.8 环绕构成的复调

所谓环绕声是指一种在直达声源方向感不变的情况下给听者带来环绕效果音质感觉的声音，是直射声音和反射声音把听者包围起来的重放方式，因此扬声器越多听者被包围的感觉越强，主要是通过时间延迟与扬声器空间布局来达到环绕效果。

与环绕相关的关键词：空间、环境、融合、杂糅、拼贴。

过去是不会把这些因素作为作曲的结构素材的，只是由于电子音乐的发展、合成技术的进步及人们对于声音还原的重新认识，使人们不断地揭秘了声音的本源，拓展了声音的内涵与外延。环绕如同共鸣、回声一样是声音必不可少的重要参数。所以，它们越来越为作曲家所重视。当下此际的严肃音乐作曲家都喜欢提前预制这些信息，这已经成为一种时代符号。当然，频谱音乐作曲家也不例外。

比较早做这方面的实验的作曲家有巴托克《两个弦乐队与钢片琴》的乐队布局，斯托克豪森《群》用三个独立管弦乐队把观众包围其中，斯氏的另一个电子音乐作品《环》更甚，他把扬声器安装成一个球阵面，让观众深入球心去感受立体旋转 360°的环绕音效。克塞纳基斯的打击乐作品《波斯波利斯》（*Persepolis*）用六个演奏家按照 60°夹角均匀布点在 360°的环面上，把观众包围其中。同时使用了 59 个扩音喇叭，分 8 个通道传输演奏信息。由于这些手法的特殊性，时间延迟的必然性，都确保了最终的音响效果肯定是复调形式。哪怕只有一个演奏者，演奏一个声音，通过扬声器的环绕及分通道的传输都构成了直达声与众多反射声的模仿复调。时至今日，环绕的手段更加丰富，甚至促发了一些新的音乐形式。比如“拼贴音乐”、“杂糅音乐”、“风格对位”……

相对于音乐作品，研究环绕可以分为空间环境因素与作品文本因素（用音符记录的内容信息）两大部分，它们的处理各有侧重。先来看空间因素。

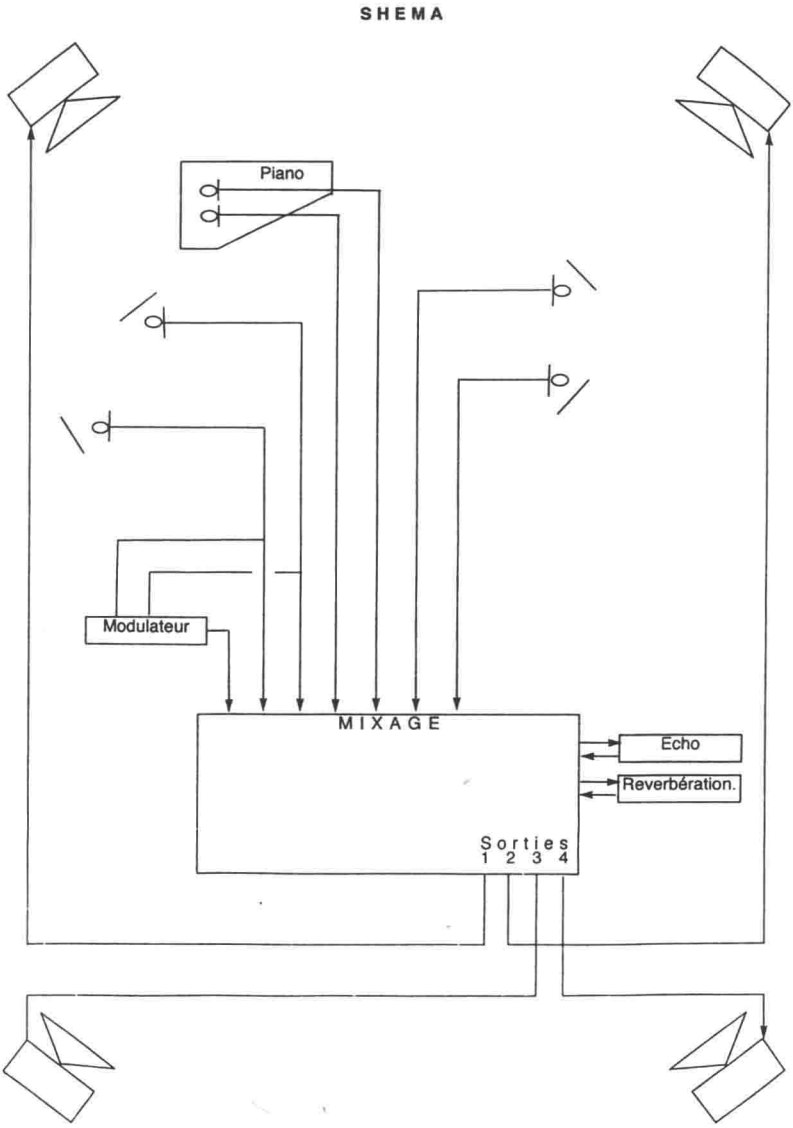
（1）空间因素构成的环绕复调

音乐作品的空间因素主要是指乐队的布局，电子扩音器、效果器、扬声器的布局分配及音乐厅声场的条件等因素，并由此产生的直达声与有用反射声、无用反射声、混响时间等参数信息。事实上，这些参数如果有意去多体会、感受，可以建立起一定的直觉经验，不用仪器，仅凭经验也能达到很好的效果。没有留意它们的存在，或许只有到失去理想的空间参数条件之时，才会倍感它们的重要。

格瑞瑟在 1993—1994 年创作（*LTcone Paradoxale*）时，提前预制乐队的空间布局。把大交响乐队按照高音和低音乐器分配为两个组，各组内又分成两个对称的小方阵，形成乐队里面套乐队的分布。另外，在两个大组中，各安排一位女歌唱家。

下图为缪哈耶 1978 年创作的作品《夕阳的十三种颜色》提前预制的乐队及音响布局。

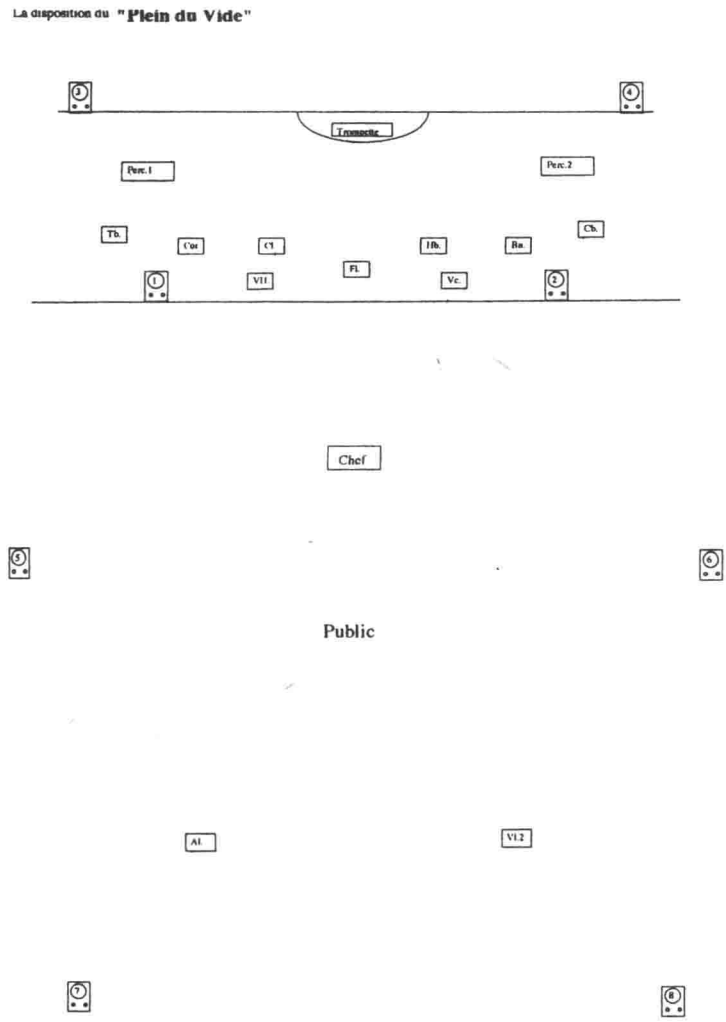
例 109：缪哈耶《夕阳的十三种颜色》预制的乐队、音响布局



图中对乐队、调音台、扬声器的安放及调制效果器、回声效果器、循环效果器的布局及调制，甚至于连接线都做了详细的规定，并且在作品总谱上做了实时记录。这些内容已经成为作品不可分隔的重要组成部分，是确保音响织体的关键因素。

我们再来看看格瑞瑟的学生，中国作曲家徐仪在为14位艺术家及电子乐器而作的室内乐作品《虚实》的空间环绕布局。

例110：徐仪室内乐作品《虚实》(*Le plein du vide*)[33]的空间环绕布局



作曲家使用了八只音箱环音乐厅安放，台上四只（前台1、2，后台3、4）环绕12位演奏家，观众大厅再安放四只音箱，厅中两侧5、6，后壁左右7、8，整个音响成为八声道环绕配置，有趣的是作曲家在观众席中还安排了两位演奏家，最终形成14位演奏家与8个音箱的22个布点（声音触发器）。虚虚实实，水乳交融，真假难分。电子扩音及提前预制的材料不留痕迹地与真实乐器融合一起。8个音箱也因此被赋予了人性化的意义，作曲家在总谱中详细记录了22个声部的全部信息。可见空间因素的作曲意义已经等同于传统真实乐器的演奏信息——声本体的意义。声本体与声环境，乃至声消费（换句话说，就是演奏者与声场、欣赏者）一起构筑了完整的作品。一不小心，欣赏者也成为作品中的一员。

（2）文本因素构成的环绕复调

文本因素构成的环绕复调主要是指风格对位、拼贴、杂糅等技法构成的复调音乐。这些技法主要是受后现代思潮的影响。后现代艺术是源于对现代艺术的反叛，它不求纯粹，善待传统，强调多元价值观和自由创造精神，提倡公众意识，表达社会功能。它确实为行将就木的现代艺术指出了一条生路。同时，我们也要看到，后现代并不是灵丹妙药，好在它也没有企图去成为灵丹妙药。世界大同、和谐共处是它追求的目标。而现代艺术从价值角度看，我们会发现它基本上属于精英文化范畴，能坚守高雅艺术的节操，不屑于与凡俗为伍，这种观念就其本性来说，是历史上贵族文化的衍生物，但社会变化了，精神贵族们失去了世袭领地，也只好去尘世中摸爬滚打。

当然，后现代也有颓废性的一面，砸烂一切条条框框，真正地置一切束缚于不顾，本是勇气。但矫枉过正，用力过猛，必将导致肌体的溃败，皮之不存，毛将焉附。更何况作为高雅艺术的音乐，如果完全蜕化为媚俗，这是出路吗？向左转，向右转都行，为我所用。但还需一个度的把握，这是一个大问题，在此，不再深究。

拼贴、杂糅音乐事实上还透出“消费主义美学”的痕迹。它们懒得再去创造符号，而直接运用已经公用化的术语，为了能使音响唤起共鸣已开始“掠世界音乐之美”[14]。不求统一，表达元素是从不同时期、不同文化中提取的。包括政坛的演讲、庙宇的圣歌、街道的喧嚣、抽水马桶、交通的噪音、电台电影的截取，等等。总之，宇宙万物的一切声源都可以借来杂糅，只要它具有暗示、影射，能召唤人们的记忆储存，就可以采用“拿来主义”为我所用，拼贴、杂糅、环绕、交叉、融合为一种新型的音乐——风格对位环绕复调。“这就导致音乐自身很难被视作单个儿、有序的主观性的流露……音乐都显现出一种特别的冷漠寒意。”[15]“音乐呈现了一种奇特的品质。”[16]

从序列音乐推崇的“强化了的主题一致性”到频谱音乐的声音合成，再到后频谱音乐的为我所用。走的正是一条从贵族到民众，从个体到社会，从单一到多元，从武断、专制到尊重生态生命的发展轨迹。但是作品的音响性、思辨性、技术性并不是呈现单一的线性发展模式，而是环形非线性发展。孰高、孰低、孰深、孰浅难以作出简单的回答。

注释：

①② Tristan Murail : Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9—11 and 13 July 1992, Contemporary Music Review Vol. 24, No. 2/3, April/June 2005, pp. 187—267.

③ 马克·安德烈·达勒巴维《天堂机械》(*Les Paradis Mecaniques*)(1982)为铜管六重奏与钢琴而作。(Editions Jobert, Paris)

④ Tristan Murail : The Revolution of Complex Sounds (translated by Joshua Cody) *Contemporary Music Review Vol*. 24, *No*. 2/3, *April/June* 2005, pp. 121—135.

⑤⑥ David Bündle March, 1996 issue of *20th—Century Music*.

⑦ 《形象》(*Pour I'image*, 1986—1987), 为长笛、双簧管、单簧管、中音萨克斯、圆号、小号、低音长号、两个打击乐、两个小提琴、中提琴、大提琴、低音贝司十四件乐器而作。

⑧ *Scuils* (Editions Jobert — Paris) is made up of seven movements and is the second part of the *Logos* cycle. The work was composed in 1991 and uses a text by Guy Lelong. It is scored for soprano, ensemble (2 flutes, 2 oboes, 3 clarinets, 2 bassoons, 2 horns, 2 trumpets, 2 trombones, tuba, 2 or 3 percussionists, 2 keyboards, harp, 3 violins, 2 violas, 2 cellos, double bass) and electronics.

⑨ 达米安·普塞特(Damien Pousset) The Works of Kaija Saariaho, Philippe Hurel and Marc—Andre Dalbavie—Stile Concertato, Stile Concitato, Stile Rappresentativo Contemporary Music Review 2000, Vol. 19, Pan 3, p. fv—l 10.

⑩ by Brian Kane〈 That Elusive "Elementary Atom of Music"〉.

⑪ 等量复调(另有译为有量卡农)文艺复兴时期佛兰德乐派作曲家奥克冈发明，运用比例记谱法创作模仿复调的一种手法。所谓比例记谱法，就是音值按拍号所表明的数学比或增或减的记谱方法。有量卡农是在声部之间改变时值的同时还要进行模仿。

⑫ 作品《王冠》为中提琴、两只长笛、两只单簧管、双簧管、大管、圆号、两只小号、低音长号、两人打击乐、三把小提琴(带功放)、低音贝司和钢琴、电子管风琴、两台雅马哈 DX7 合成器而作。

⑬ 徐仪室内乐作品《虚实》(*Le plein du vide*, 1997)为两把小提琴、中提琴、大提琴、低音提琴、长笛、双簧管、单簧管、大管、小号、圆号、长号、两个打击乐及八只音箱而作。

⑭⑮⑯ 伊凡·休伊特(Ivan Hewtt)《修补裂痕》"音乐的现代性危机及后现代状况"，孙红杰译，杨燕迪校，华东师范大学出版社 2006 年版，第 184、186、199 页。

第九章 频谱音乐的曲式原则

在这里，我们把研究重点转到频谱音乐构成曲式的原则上去，而不是曲式本身。也就是说不把宏观总结，绘制某个作品的曲式图作为必须工作，相反去重视特定的阶段（特选的片段）折射出来的曲式意义。这样做的原因是频谱音乐的主要贡献从可操作的技术层面来看，正好是在“微观的细部处理之中”，他们是由于对声音事物“微观的深入、极限的认识”而成就了对声音本体“宏观的把握”，进而总结出大的音乐创作的原则、态度。也就是说，从微观、细部入手可以“放大频谱音乐”的进步意义，更清楚地看到它与其前面出现过的风格流派的区别。倘若真的去绘制某某作品的曲式图，可能反倒会冲淡这种认识，产生“不过如此”的轻视而表面的看法，这尤其是对后频谱时期，由于他们不再回避一切既有的原则，更加强调听众的记忆与参与意识，因而重复、变奏、衍生、结构再现、结构平衡等传统手法又被广为运用。

曲式通常表示音乐的“时空结构”，频谱音乐对此的最大贡献是通过仪器分析，频谱显现，使得这本来属于纯理论范畴的内容，成为了一种可视的、具有生命力的“视在声源”。自此，我们不仅可以用文本分析去了解曲式，用耳朵去感受曲式，还增加了一种重要的方法——用眼睛去实际观察声音状态由生到死的变化全过程。这被称为“时间过渡性”特征，通常采用 ADSR 包络参数来记录。

事实上，通过千余年的中外音乐艺术的发展，曲式的理论及美学观念已经发展得相当成熟，很难再有突破。虽然说曲无定式，这只是外在表象而已。但一些大的原则还是成为了人们默许的行为规范。比如，并列、衍生、对比、再现（重复）、复合、循环、变奏、平衡这些原则；犹豫、阻断、转折、分裂、交叉、多相嵌入、重叠，等等，这些经典布局手法，哪个时期、哪个流派不在使用呢？可能有些作曲家会在某些小的领域做得比较极致，具有进步意义。但他这安身立命的“绝技”很可能成为他的优点，又是他的缺点。在这一点上，早期频谱音乐就是一个最好的证明。

早期频谱音乐过分强调声音的“自身历史性”，一切参数都要来源于基音的“自我繁殖”，使其曲式意义的时间轴——时间过渡性特征陷入了“单维参数”的陷阱，最终使得曲式呈示较为单调化，没有反映出曲式内

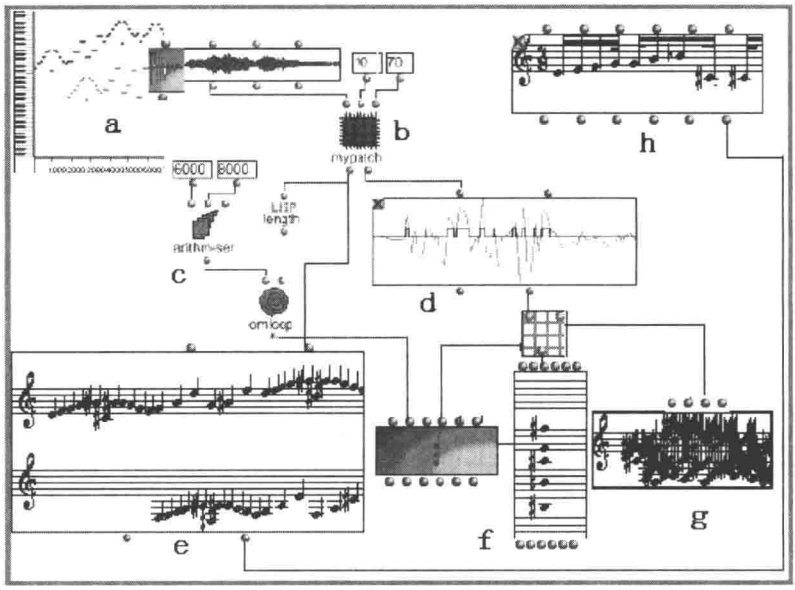
涵的全部意义。这也成为了格瑞瑟与缪哈耶自 80 年代后期开始转型的原因之一，他们离开了早期严格的“频谱理论”，转而更加关心“中断”与“不可预知性的曲式”。由于对时间的多维认识的成果，使不太完善的早期频谱理论得到了“自我修缮”，从而为曲式的多样性提供了理论依据。以下我们主要研究频谱音乐在曲式领域的进步意义。

从某种声音状态到声音还原的模仿模式，从模仿模式再到曲式，是音色、音响和它们的运用在作曲过程的体验。它们需要一种抽象的音色表示法。频谱音乐是追求音色导向的音乐，在曲式结构上更多地强调色彩因素，在永恒、持续的过程中，不断地进行音色的微调，使其音响结构不断地变化。频谱揭示了声音的触发—生长—持续—死亡的全过程，这个过程有它自身的逻辑规律，我们作曲的一部分内容就是要用一种可以察觉的语汇去记录这个过程现象。这个过程从某个意义上说就是音响的协和变迁过程。

以生态学的态度去面对声音是频谱音乐的一大贡献，格瑞瑟提出几乎具有道德驱动力的呼吁——要触及事物的根本[①]。

法国 IRCAM 实验中心自 1997 年隆重推出了能对声音进行实时分析，并可以把频谱仪的内容直接转化为音符的作曲软件 Open Music 。此后，他们进行不断地改进，现在已经发展到了 7.0 版本，通过这个软件几乎可以告诉我们所有作曲所需结构力因素的信息。下图为 Open Music 的工作原理简化图。

例 111：Open Music 工作原理简图[②]



图中 a 表示基音触发录音记录的信号（Wave 文件），b 表示提前预制到电脑程序中的模块转换程序，c 表示力度、时间长度、量化精确度、泛音范围、节奏、速度、MIDI 参数等信息（可由研究者设定各自的范围），d 表示波形图，e 表示谐波及自我繁殖矩阵，f 表示自我繁殖的多重和弦，g 表示带宽包络，h 表示谐波加入时间量化值得到的旋律。

这就是现代科技给我们带来的实惠，通过一个简单的基音分析，它瞬间就列出了音列、复调（矩阵）、和弦、曲式（包络）、配器（音色的协和序进）传统四大件的全部内容，甚至还可以得到具有节奏律动的旋律线。它为我们打开了一个无法仅用感官去捕捉的神秘微观世界。告诉了我们许多令人惊奇、从未可知的秘密。在此不得不惊叹当代科技的神奇！尽管科学并不能等同于艺术，但是它为我们带来的便利着实让我们受用不尽。

今天的成果故然得益于电子音乐的发展，尤其是电脑技术的普及与运用。但是，早期频谱音乐作曲家们众志成城的努力，艰辛的奋斗，甚至于挫折，都为今天的成就作出了不可磨灭的巨大贡献。尤其是他们所崇尚的作曲观念、思考问题的思路与当代电子音乐的发展非常地契合。他们无疑是把严肃的管弦乐创作与当代电子音乐成果融合得最好的当代音乐流派。然而，今天已经实现的现实，却还是十几年前频谱音乐作曲家的奢望！一个期盼实现的愿景！下面我们从缪哈耶 1992 年 7 月 9—13 日在法国南部城市阿维尼翁讲学的讲稿内容中摘录几段文字[③]来回顾历史的变迁过程。

> “如果我们想在作品中运用更精致的技术手段，计算机的使用就是必不可少的工具，我们需要有价值的计算机作曲论文，或者说，我们需要计算机辅助作曲系统 CAO（computer-assisted orchestration system）。在不久的将来，如果我们能梦想拥有‘机器作曲’，作曲家能够做这样的实验……把所有他听到过的音响与他想象的音响结合起来。频谱与频谱精神的未来将充满希望！”
>
> “运用计算机来作曲并不是一个新事物，早在 1956 年，在美国伊利诺斯州立大学，Lejaren Hiller 就已经这样创作了一部组曲 Ⅱ liac，这部作品的问世引起了世界众多作曲家的关注和追随，引发了我们现在称之为‘计算音乐’的趋势。”
>
> “上世纪六七十年代，计算机音乐集中在发展声音合成技术领域，取得了许多成果。尽管这样，在 1981 年我在 IRCAM 工作期间，我发现了多种合成程序，但没有一种能真正帮助作曲，像频率怎么转换成音符，反之亦然。都做不到。这期间我决定一定要发展一种程序能够

计算分析频谱、调制、失真、时间过渡等等参数信息。”

“在作品《裂变》中每一个声音保持了10—30个基本参数，诸如：音高、动态、起奏、包络动态、空间包络、颤音及它们在振幅、频率、包络上的不同表现等等。一个简单的声音通常有数百个参数信息。用手工设计这些参数当然是不可能的，因此，我需要一个程序，它能够计算出所有需要的参数信息，提供修改与声音合成的指导。Yamaha DX and TX synthesizers 具有这些功能。”

上述内容足见频谱音乐作曲家对计算机作曲系统的期盼，他们在20世纪70年代的作品主要是以虚拟合成技术为主，其中有许多参数需要手工计算；进入80年代，由于雅马哈合成器DX和TX系列的相继研制成功，大大促进了频谱音乐的发展，使他们过去仅存于理性的想法、观念得到了具体实践的可能，声音合成技术由虚拟变成现实；由加减法合成发展到环形、振幅、频率合成；对声本体的认识也由线性发展到非线性；声音质子的弹射轨迹由直射深入到衍射、折射；所有这些成果都可以从频谱音乐的曲式发展轨迹得到验证。进入90年代以后，频谱音乐与电子音乐联系得更加紧密，早期独树一帜的严格法则，矫枉过正的观念行为得以修正和完善。时至今日，算法作曲、交互式作曲无不渗透着频谱音乐的身影，它们还将继续融合、发展下去。

9.1 时间过渡性

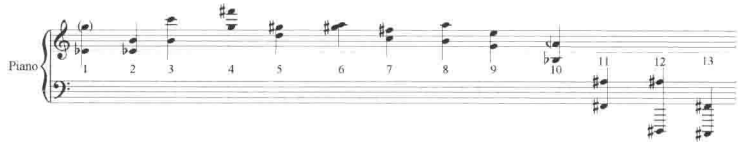
“时间过渡性”已经成为了频谱音乐的关键词语，前面已多有介绍。在此，主要看它是怎样在曲式上体现的。我们已经知道每一种独立的声音都有自己独特的时间过渡特性，也就是说，各自的ADSR包络各不相同。反过来，我们可以按照各自的ADSR包络的参数去合成，建构它们的声音。这就是早期频谱音乐在曲式建构上的主要思想。有一点必须预先说明：频谱离散图分析的声音，无论是把它作为独立的生命个体、生命整体研究，还是由表及里作分子—原子—电子—质子—纳米层层深入式的研究……它给我们展示的景象相对于实际的音乐作品来说还是一个微观世界。这就要求我们使用显微镜看进去，放大镜拉出来的方法，去扩展、延长这些事件。“起音（attack）—衰减（decay）—保持（sustain）—释音（release）”事实上反映了声音的不同状态，它们综合频谱的收敛性及谐波性特征，实时地控制着音色的变化。由此，引出一个早期频谱音乐曲式补

充原则——声音状态原则。也就是说，以声音的状态变化作为曲式结构的依据。它就相当于古典音乐以和声终止式作为曲式判断的依据一样。典型例子有缪哈耶于 1978 年创作的室内作品《夕阳的十三种颜色》。

（1）ADSR[4]原则——声音状态分离原则

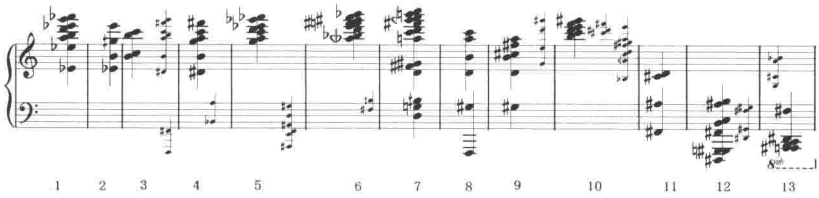
缪哈耶在创作这部作品时，提前预制了十三种音程，每一种音程表示一种夕阳的颜色，当然在实际创作中他采用声音“自身生成”、“繁殖”的原理，丰富了音响结构，由于其预制的十三种音程超越了传统曲式意义，也就是说很难用某种“传统曲式”来“套用”它的结构，这正是本作品在曲式方面的进步意义。以下就把这个作品预制的十三种音程及作曲后成形的十三种声音状态（生成、繁殖）构成的“和弦投影”做一个对比研究，从中就能揣摩出十之一二作曲家这样创作的真实用意。参见例 112。

例 112：缪哈耶《夕阳的十三种颜色》曲式布局



单看这个谱例，它仅仅是没有生命的“音程”而已，怎么样把它赋予生命呢？当然需要艺术化的“再生”过程，而这个过程就是每一个音程的 ADSR 包络，把这些音程分别放入频谱仪去分析，从而记录、再现它们的“触发—生长—持续—死亡”的全过程，当然它们的色谱递进关系还可以去参考太阳的色谱分析图。而后，再根据乐器及其不同演奏法的属性最佳地搭配它们的组合形式，运用加减法、共振峰（这个作品为 1978 年创作，变形合成技术还没有引入频谱音乐，变形合成的真正运用是在 1980 年以后，以雅马哈的 DX 合成器出产为标志）合成技术去“生成”和“繁殖”上面十三种音程，同时根据谐波分布的收敛性、时间过渡性去安排它们的节奏方式与声部组合方式，这个重新塑造生命体的过程，除了需要大量技术参数的准备和技术积淀以外，还需要作曲家的经验与天赋，需要他天马行空、才思泉涌的艺术想象。下面就是截稿后的十三种和弦投影。

例 113：缪哈耶《夕阳的十三种颜色》截稿后的和弦投影图



必须要说明的是，上面的和弦是每一个阶段的“主要生成音”的投影和弦，在作品中它们并不是同时出现，而是先后出现。谱表中的小音符和弦为每个阶段延后出现的和声音，只有最后一次另外，它是先于主要和弦出现。可能有人会问：难道每个阶段就仅有谱例上标识的一个和弦吗？差不多是这样，缪哈耶喜欢使用一种他称为“频率扫描”的技术让各自声部不停地重复持续某些音，只有在导入，尤其是在连接、过度，或是延伸的时候，他才变异和弦音的组成形式，通常是由低频向高频发展，由协和频谱向不协和频谱发展。这在本作品的最后一种颜色（13）里面，表现得最为显著，这一次作曲家预制的主要和弦已经发展到了极限低音了，但是作品并没有在这个音区结束，而是延续了一个长长的尾声，不停地向高音频率发展，以致长笛和单簧管最后冲向极限高音。但是不管这个尾声延续多长，它真正的骨架和弦、音程或者说基音正是作曲家已经预制的音程、基音，其后仅仅是它们放大的延时混响、余音绕梁而已，这正是上面投影和弦提取的主要依据。

仔细对照音程预制与和弦投影图会发现，所有的预制音程都包容在投影和弦中，其中有十一次预制音程在主要和弦中出现，但是其中的 9 和 10 次，预制音程是后于主要和弦出现，也就是说，先出现衍生的和弦，后出现骨架的音程，这是两次连续的“逆向安排”。可见艺术创作之中反逻辑的运用是一种重要的手段。

对 ADSR 原则要善于运用辩证法，大可以把它扩展到宇宙，小可以深入到纳米，都可以把它们作为独立的生命个体，遵循着一条“触发—生长—持续—死亡”的全过程。只不过各自的人生轨迹不同，时间长短不同罢了！针对作品就是宏观整体布局与微观颗粒生成都作为生命全过程看待。

格瑞瑟在作品《起源》（*Derives*，1973—1974）总谱第 31 页处，整个弦乐组分奏，一台琴演奏一个独立声部。而这里的一个声部仅仅是一个类似“蝌蚪”一样的上滑音，千万个蝌蚪在那里爬行，汇成一股巨大的洪流，奔腾呼啸，奋勇向前（谱例参见例 137 配器内容 11.2《协和序进原则》）。

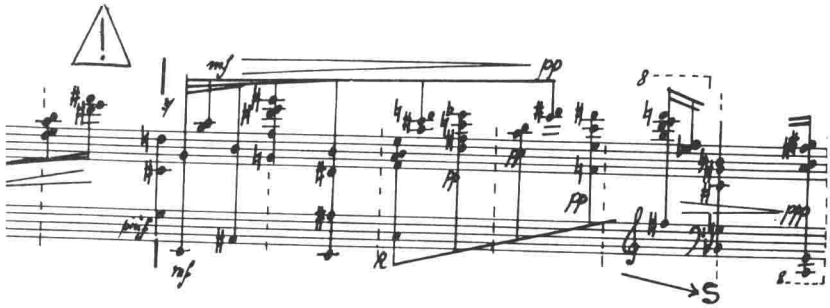
作曲家在这里采用的是粒子合成技术，把每一个音（粒子）作为独立的生命体，汇成粒子云。就像布列兹首演他的作品《为管弦乐队而作的记谱法》（1978 年），乐队演奏员对他采用一百多个独奏者组成的特殊乐队深感不解，向他询问：“我们一小时又一小时，一天又一天地排练，可既然这些声部无法听到，你为什么还要写呢？”布列兹说：“事实并非这样，你在看一棵树的时候，并不会看到每一片树叶。可是如果树叶没有了，你当

然就会看出来。我需要你们每一个人演奏的声部，我要的是所有的树叶。”

树叶这微小的生命个体，迎光沐雨；又甘做一个细胞，造氧吸尘，终换来枝繁叶茂，成就了一个更大的生命体。

缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》总谱第 21 页处出现了下例的钢琴织体。

例 114：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》总谱第 21 页



看到谱例就像看到频谱离散图一样，织体结构完全反映了频谱的谐波性、收敛性特征。

A 阶段：先由基音与它的低频音起奏，并持续（踏板作用及中间点的呼应）。

D 阶段：中高频和弦依次出现。

S 阶段：频谱稳定带宽持续。

R 阶段：收束释音。

请注意，ADSR 原则并不是说所有的声音都必须包含这四个因素，在此强调的是声音个体的独立生命（声的历史）。宇宙间的每一个生命可长可短，例 113《夕阳的十三种颜色》就用到了十三种声的状态，采用扩展的手法来刻画“夕阳”这个生命个体；例 137《起源》虽然生命个体小到了一个“蝌蚪”，但是如果以粒子包络的观点来看，它包含了起奏、延持、衰减、振幅、持续时间五个方面的信息；另外有一些声音，像皮制、木制打击乐声音没有持续阶段就直接释音，如敲击木鱼只有起音和保持两段；还有像管风琴没有衰减阶段，雷声达到最大值就立即释音；甚至有些合成器只有 AD 这两段包络发生器（详细内容参见第一章之 1.4《时间过渡性》）。所以说 ADSR 原则只是一个生命体的象征，千万不可以绝对理解。

综上所述，在音乐作品中，单个音、音程、动机、乐汇、乐节、乐句、乐段、乐章、独立作品无不可以看作生命的个体，它们都有自己的 ADSR 生命轨迹。

9.2 自我繁殖与自我破坏（阻断）原则

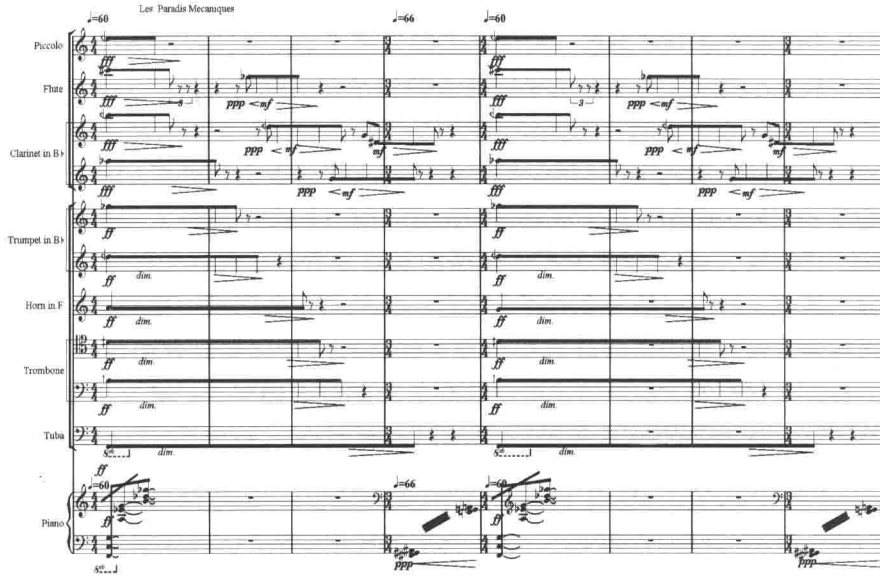
格瑞瑟1970—1980年的作品中一直保持着自我繁殖与自我破坏（阻断）的技术，他发现声音的环绕是围绕着基音永远运动的。声音在每一个瞬间的“切片”都是基音产生的谐波的积蓄和自我繁殖，声音的曲式正好叙述了这种自我繁殖、储藏的过程（声音的历史）。

> 声音的变革与发展必将与作品的设计、创作相随而行，声音正在变成它将要变成的东西。[5]

杰勒德·格瑞瑟在1975年创作的作品《分音》使用的主要就是这种方法。参看第五章《频谱音乐的声音合成原理》之5.2《变形合成》中的环形合成内容。

马克·安德烈·达勒巴维于1982年创作了一部室内乐作品《天堂机械》（*Les Paradis Mecaniques*），这是个15分钟的作品，为铜管六重奏与钢琴而作。次年，他又写了第二个版本，增加了两只长笛，两只单簧管，参见例115。

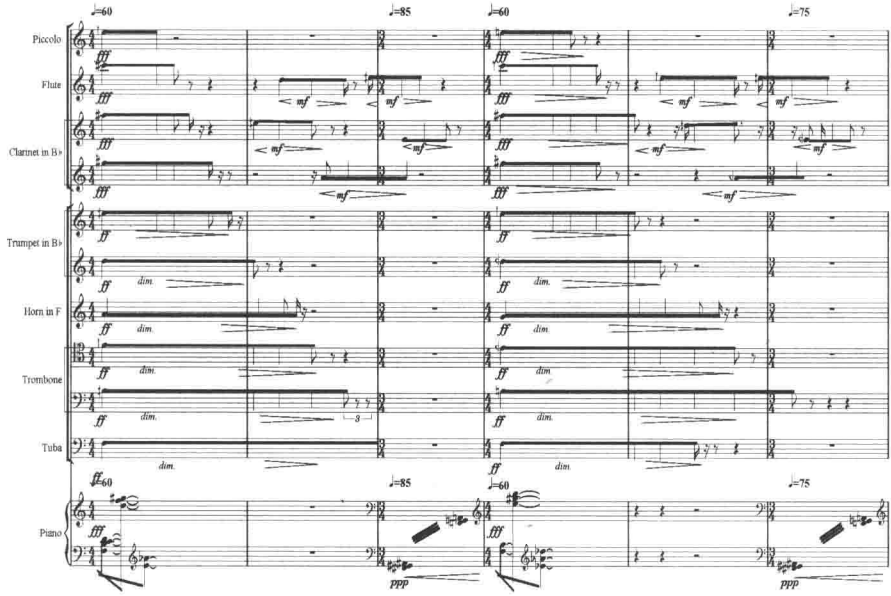
例115：马克·安德烈·达勒巴维作品《天堂机械》总谱第3页



(Editions Jobert, Paris)

这部作品是典型的频谱音乐思维，织体布局完全按照声音的自我繁殖，频谱的谐波分布来安排，采用原形合成技术。谐波系列的收敛性也完全按照由高频至低频的结束方式，和弦也采用加法（钢琴部），而后在管乐组里稀释、分化，管乐作为钢琴的谐波扩展一起出现（起奏阶段），而后短时保持，就自高频开始向低频发展做释音收束，这种织体本身就是一个频谱离散图。这种写作被称为“生态笔迹”（biomorphic writing）[6]。虽然只是一个四小节的乐汇（后四小节为完全重复），但生命的过程 ADSR 原则已经体现得非常充分。

例 116：马克·安德烈·达勒巴维作品《天堂机械》总谱第 4 页



(Editions Jobert, Paris)

这页所用的织体手法仍然同前，但是仔细对比音高、和弦、时间持续参量会发现都不一样，乐汇在做减时运动，而且音高都做了调整。本例的后三小节更是前三小节的微分调整，多数高频音都作了 1/4 音高的调整，低频音高也在 2 度以内调整。通过声音合成及泛音的作用相关内容的介绍，我们知道这种情况不可能在同一个基音的线性谐波中出现，这里一定改变了基音（本例前三小节较之于总谱第 3 页），更有可能就是谐波失真（后三小节为前三小节的谐波失真）。像这样改变基音，尤其是谐波失真的手法是自我破坏（阻断）原则的常用手段。作曲家就是为了提前预制、隐藏一对矛盾在这里，为以后的发展留下伏笔。通常情况下，阻断原则是伴随着

织体、材料的改变而进行的；本例织体统一，声音的合成方法却改变了（由原形合成发展到变形合成），这种改变非常隐秘，是一种“静态的变化”，得到的音响也同样神奇！这或许就是频谱音乐最有特性的一个标志之一，但这种特征如果长时间保持，即长时间进行音色微调，也同样容易使人产生“儒雅有余，粗野不足”的感觉，总是期待着它的爆发。

频谱音乐需要一个内在的曲式结构，它多是以一个声音的时间过渡性为依据。但是一个声音如同一个生命一样，它生长在大千世界不可能单独存在，它一定与别的生命有着千丝万缕的联系。那么这种相互依存、相互联系的生存环境及生命状态，频谱音乐如何表现呢？总不至于把生命个体来个简单排序吧！一一按照时间过渡性从生到死，那宇宙世界就太简单了。如果要打乱这种虚拟的顺序，那么频谱音乐强调的时间过渡性又如何延续？它还有什么优势可言？

我相信这个问题同样困扰着格瑞瑟、缪哈耶为代表的早期频谱作曲家。虽然他们在早期作品中也做了“多项探索”，但是对时间的过渡性的认识上还是陷入了“单维”的陷阱。事实上，时间过渡性并不只是单维的延续，而是多维延续。声音在空间的传播是以球阵面进行，有直射、衍射、折射、繁殖、吸收、敲打、干涉、重叠等多种状态。因此，对声本体的曲式结构，应该加入变焦、多维的视角，这样才能看到它们更加复杂的非线性多面体拓扑结构，衍射、折射的质子轨迹也能尽收眼底。为此，就有了下面的补充原则。

9.3 可预测与不可预测原则

格瑞瑟与音乐家大卫·布顿尔（David Bündler）的谈话[7]中说：

> 音乐语言一般要向两个方向运动——可预知方向和不可预知方向发展；可预知方向使得音乐动听、生动；不可预知方向使得音乐中断、意料之外。我们如何来使用一种未知的语言（还没有建立起来的语言）来创作这种情理之中意料之外的音乐呢？我自己的经验是，第一先去建立一个游戏规则——曲式结构（为人们易于察觉的结构、简单明了）为的是在其后容易去改变它、破坏它的发展方向；我通常不想把听众放到信息的后面，使他们无所适从。在那里肯定有路、有一些小径，就像阿里乌斯信徒在迷宫里一样。
>
> ……尽管不可预测，但可理解、可记忆，这种记忆不是连贯的，

而是终端的，离散的。

……比如说缪哈耶 1980 年创作《龚德沃呐》时，使用频率合成技术，其中有连续性的部分，也有大量突然的断裂，再引发许多别的转折，就是要在逻辑性和连贯性的后面，还要有一种分裂性、破碎性。在一些万能原理之中插入一些可移动的曲式结构，这个简短的过程就是（频谱音乐）发展的步伐。它增加了作品曲式的间断性，增强了音乐的动力性，同时也显示了对于传统的背离性。

……我们要去发现一些“新的”（我们想说，但是从来没有说过的，用旧的材料不可能表达的）声音物质，新的思想需要新的材料来构建。旧的音乐太有方向性了、太可预言了，我们要去找到一种再次使人吃惊的、具有差异性的阻断方法。避免“陈腐地使用，陈腐的语言”。

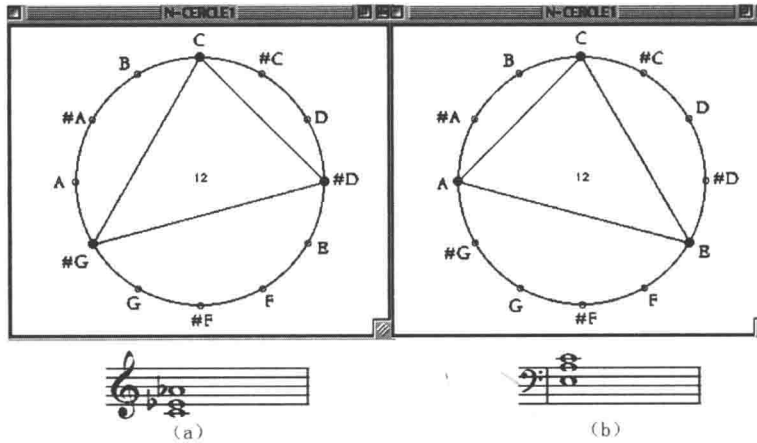
不可预知与阻断有相似之处，但在认识的深度上又有不同。阻断可以是可知的，也可以是不可知的。可知的阻断，比如 ADSR 包络的四种声音状态，人们可以仅凭感官就能感知；而不可知性的阻断，你仅凭感知，就不可能知道它将向何方？当亲身感受到它的发生时，首先是瞠目结舌，而后高速调用以前的生活经验，加之逻辑推理，才豁然大悟，再到佩服之至。这是一种很高的境界，千万不可走火入魔，由不可知走到拒绝知（坚定不移地拒绝任何期待、记忆、理解）的绝境中去。反之，不可知一定是阻断的。

仅此一小步，频谱音乐作曲家也走了数年，可见艺术的创新、进步有多么难。

不可预知性是从“自我因素”发展到“外在因素”；从直射发展到衍射、折射；从繁殖发展到吸收、干涉；从线性发展到非线性的过程。Open Music 软件的和弦生成及多重矩阵运用了一种“Zn 理论”把声场质点的各种结构用数学模式提前预制在软件里。具体原理如下：

根据不同的量化精确度，把一个圆均分为 12 份（24、48 份……）与 12（24、48）平均律相对应。假设基音的谐波系列倍频音正好是一个十二平均律，微分音的谐波由于振幅太弱忽略不计。那么它们之间就可以构成三个音至十二个音的若干和弦。下面以三音和弦为例，参见例 117。

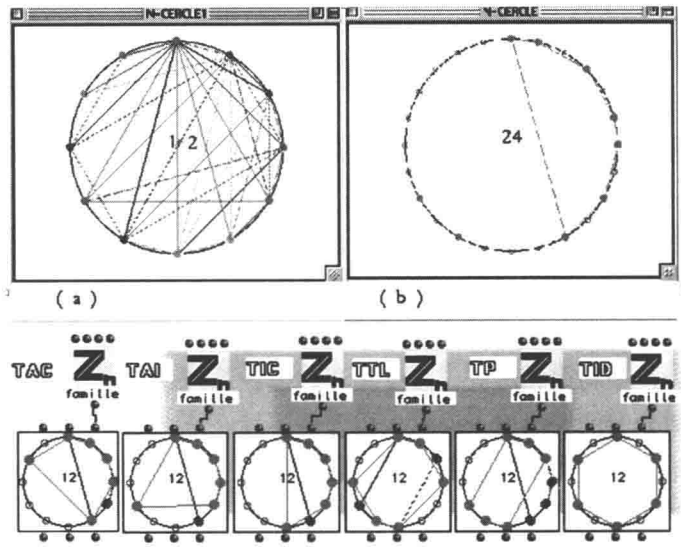
例 117：Open Music Zn 理论



(a) (b)

假设上面左图（a）中的三角形的三个顶点为一个基音谐波系列的共振峰音，它们正好组成一个大三和弦，这个三角形可以在圆内旋转 360°，得到 12 个音高不同、相位不同的全等三角形（三个边及面积都相等），它们的音色、音响是不一样的，只是和弦结构相同，这些和弦是原型和弦的“有限移位和弦”。注意看右边的图（b），它是左图（a）的倒影和弦（对照五线谱），中轴为中央 C。这个和弦同样可以得到自己的“倒影有限移位和弦”。那么一个谐波系列到底能构成什么样的和弦结构？这就可以根据声音自身的属性，通过傅立叶转换，把它们的倍频、旁频、间谐波所有分音与量化精确度结合起来，这样在一个圆里，就能生成所有和弦结构。

例 117 续：Open Music Zn 理论



(a) (b)

(c)

上图（a）十二平均律为量化单位，（b）二十四平均律为量化单位，（c）和弦结构形式。

TAC 自我繁殖和弦

TAI 倒影和弦

TIC 倒影移位和弦

TTL 有限移位和弦

TP 分割和弦

TID 等幂和弦

这里讲的和弦结构涉及了空间拓扑问题。根本上说，还是揭示了曲式结构的深度问题，它带给我们以启发。因而我们看待曲式不能仅做平面理解，而要用空间拓扑透视的观点，用多维的时间过渡性，在逻辑序进中加入逆向逻辑（或者叫反逻辑）去考量曲式。

9.4 协和序进原则

所谓协和序进原则，就是按照协和向不协和发展（或逆向发展）的逻辑序进来安排曲式的结构。

格瑞瑟说：

> “对于协和的理解要重视频率协和这个词，由于把注意力放到频率的部分上，也就是谐波系列的特征上，根据量化取值的不同，就会出现微分音结构（四分、八分甚至更小的音）。它们开拓出了一个无限的协和领域。由此也使得管弦乐配器朝着不可思议的极限精致化发展。我努力地去寻找多数人能够体会得到的、新的协和的意识和方法。协和从头到尾都是与曲式有关的。它曾经给予了调性音乐强大的结构力，今天，又被迫地通过装饰性作用来简单体现，协和与音质不仅仅是音高的概念而且还是个与时间过渡性有关的曲式的概念。使用微分音，一是可以使音响丰富；二是出于音阶风格的考虑；三是为了使音乐充满活力。”[8]
>
> “频谱（分音结构）——决定协和度——决定音乐结构。音乐的决定因素不是技术，而是指导技术使用的原则、思想和观念。研究音质、研究协和的最初动因是为了求得变化，找到音乐叙述的新语汇。频谱成为了实现这种目的的工具。”[9]

上述话语充分显示了格瑞瑟作为频谱领袖的战略智慧，而另一位大师缪哈耶却尽显战术才华。

缪哈耶说：

“在1983年，我写《裂变》时是为了把计算机合成的电子声音与管弦乐声音尽可能地融合起来，为了达到这个目的，乐队的声音必须首先分解，简化它的基本成份，然后再来重组，合成基本元素成为新的集合，进而来创作可望得到的音色与协和（利用上下文暗示的听觉类型和振幅数据），这几乎是最接近‘科学’的作曲。许多原则都在《裂变》这部作品使用了，1982/1983在*IRCAM*认识了这些原理，作品中的所有材料和片段（包括管弦乐与磁带的内容），它们的微分过程与进展的体系，都是通过对协和、不协和频谱的分解与人工合成的分析得来的。绝大多数频谱来自于乐器，像钢琴低音，铜管乐器，还有大提琴都经常被使用。”[10]

“磁带没有试图去模仿乐器的声音，而是为协和音色的结构服务。许多类型的频谱都是起这个作用。”[11]

缪哈耶在阿维尼翁（Avignon Conferences）讲学中还为这部作品做了如下的曲式分析。

《瓦解》（*Disintegrations*）这部作品的和弦及音色结构布局如下[12]：

第一部分：以钢琴最低的升*A*1与升*C*3分别为基音构成两个集合系列交替使用。

第二部分：采用环形调制出丰富的声音，运用频谱的衍射、叠加、异步错位技术（第四部分也有部分运用）。

第三部分：以乐器谐波为主，创造一种银铃般的高频打击音块。

第四部分：使用非线性的频率移动（第三部分也有局部运用）。

第五部分：频率在协和频谱内连续滑动（这是这部作品唯一真正的协和频谱）获得一种敲打效果，而后增加其不协和性。

第六部分：连续的频率调制。

第七部分：急速地改变七个谐波失真频谱（即由它构成的和弦）。乐器部分使用半音，这是最快速度的保证。

第八部分：虚拟环形调制矩阵音构成崩溃、瓦解。

第九部分：从一个八度向另一个八度转移协和频谱，每一次协和

频谱的周期循环，基音都移低一个八度。（这样做能得到相似的音色，但是可以增加不协和性。）

第十部分：由虚拟环形调制矩阵音与长号 E 音（$E2$）周围越来越多的（倍频）音交织。

最后部分：强调电子化的频谱内容。持续三分钟。

在讲学中，缪哈耶为曲式做了如下结论[13]：

（1）曲式的有机组织更多是依靠声音的自我繁殖。

（2）要去探索在不同维度之间的所有与曲式的有机组织有关的相互融合的极限认识。

（3）要去揭秘……分离与综合，衍射与中断的所有潜藏关系，揭秘它们的发展过程（来作为反传统的工具）。

（4）需要使用中立（中性）的音（声音素材原型）来强化作品有机组织，使其便于认识和记忆。

（5）叠置使用相对的、相异的泛音，为后期的发展隐伏矛盾；叠置使用并列关系的曲式，使其强化不同时帧的矛盾。

注释：

① 转引伊凡·休伊特（Ivan Hewtt）《修补裂痕》“音乐的现代性危机及后现代状况”，孙红杰译，杨燕迪校，华东师范大学出版社 2006 年版，第 172 页。

② 摘自 Open Music 说明。

③ 讲课稿英语版发表于 Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，pp. 187—267.

④ 此时的 ADSR 不仅是包络的意思，更表示声音的不同状态。

⑤ P. A. Castanet ：Geraard Grisey and the Foliation of time Contemporary Music Review 2000，Vol. 19，Part 3，pp. 29—40.

⑥ Damien Pousset Translated by Joshua Fineberg and Ronan Hyacinthe Contemporary Music Review 2000，Vol. 19，Part 3，pp. 67—113. The Works of Kaija Saariaho，Philippe Hurel and Marc—Andre Dalbavie—Stile Concertato，Stile Concitato，Stile Rappresentativo.

⑦ 引自 David Bündle *Gerard Grisey* March，1996 issue of *20th—Century Music*，可从 http：//www. angelfire. com/music2/davidbundler/grisey. html 下载本文。

⑧⑨ David Bündle：Gerard Grisey March，1996 issue of *20th—Century Music*.

⑩⑪ Tristan Murail: Scelsi, De-composer-Scelsi, Contemporary Music Review Vol. 24. NO. 2/3, April/June 2005. p. 173.

⑫⑬ Tristan Murail : Villeneuve-les-Avignon Conferences, Centre Acanthes, 9—11 and 13 July 1992. Contemporary Music Review Vol. 24, No. 2/3, April/June 2005, pp. 187—267.

第十章 节奏参数

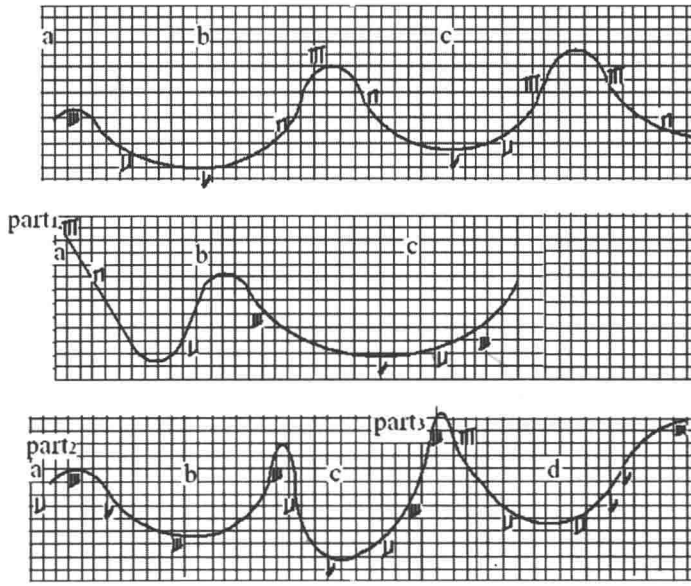
看过 Open Music 工作原理简图例 117，可能会对它仅测试一个基音，就能把谐波系列转化为具有节奏律动的旋律线感到神奇，或是心存疑虑。这是怎么形成的呢？早期频谱音乐的节奏依据又是什么？这些问题期待揭秘。

频谱音乐的节奏处理相对于它的和声、复调、曲式、配器的进步意义而言，要保守一些。或者说，没有它们前卫、先进。这不是说它就是缺点，不好！按道理说，由于对声音细部、微观的认识已经达到了前所未有的高度，无论是和声、复调、曲式、配器都达到了“极限精致化”的发展程度，为什么节奏因素不同时“极限精致化”呢？如果能这样，那么至少可以让总谱织体中的所有发音点全部错位、不重叠（或少重叠）、各自独立、成为真正意义的粒子云，使得音响结构完全变成“点彩画”。既然量化精密度已经达到了这么“极限精致”的程度，有什么理由不让节奏因素也达到同样高度呢？是频谱音乐作曲家无为，还是不为？

节奏因素[①]要实现这个目的并非难事，我深信频谱音乐作曲家驾驭这等“概率节奏”之能力绰绰有余。因此，它不可能是无为。这里不这样处理的真正原因是不为。试设想，如果节奏因素真的达到了这等“精致程度”那会是怎样一副“模糊音响”啊！它肯定会为模糊而模糊，颠覆模糊中的清晰、清晰中的模糊的辩证关系。和弦、复调的精密、微型化处理可以增强音响的不协和性；曲式的精密化处理是善用微观与宏观的辩证关系，多维、变焦地考量曲式问题；配器的极限精致处理是为了微调、雕琢声音音色结构；唯独节奏的精密细致处理会“乱”成一团，越极限精致越乱！这就完全违背了频谱音乐的宗旨——让音乐更迈向纯粹与透明。

下面我们来看怎么通过频谱及波形图来提取旋律线的音高与节奏因素。缪哈耶在 1988 年受纳什（Nash）艺术委员会委约创作了一部室内乐作品《瞭望》（*Vues Aeriennes*）[②]，作品中其中一段圆号旋律来自下面的频谱转换图。

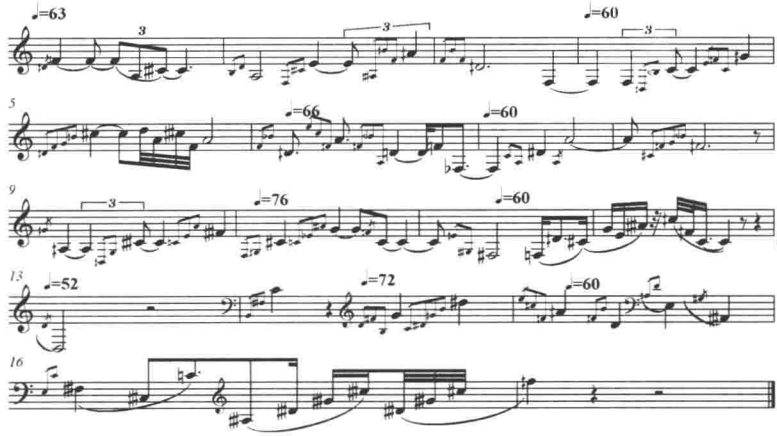
例 118：缪哈耶作品《瞭望》中圆号原始协和频谱与三次失真[③]



其中横轴 X 表示时间轴，纵轴 Y 表示频率音高，图中的曲线为波形。

每一个波峰、波谷都要取一个音高（测出它的频率），根据曲线的状态及时间持续性来设计相应的最小节奏值单位，根据需要在波峰与波谷的下行（逆向就上行）曲线中取样，作为波形切片，并测出它的频率和持续时间。图中的纵横坐标就是量化精确度。把上面得到的全部数据转化成音符记谱，得到例 119。

例 119：作品《瞭望》中圆号原始协和频谱与三次失真转化的旋律线



事实上，Open Music 运用的节奏树（rhythm tree）的生成转换正是这个原理。由此也可以看出频谱音乐对后期的软件开发所作出的历史性贡献。

已成经典的传统曲式原则及节奏组合方式，频谱音乐都在使用，尤其在后频谱音乐作曲家身上体现得更加显著。因为它们不作为本文研究的重点，在此不做研究。

注释：

① 这里的节奏因素不是指节拍号、节奏速度这些因素，不是指单一声部的节奏型。节拍号、节奏速度当然要精致、要准确。不精致、不准确，就没有了统一的标准，群龙无首，乱成一团；这里的节奏因素主要是指多维节奏——也就是多声部层，它们的综合节奏。如果这种节奏投影的单位值越小，综合节奏型就会越密集、越精致。同时各声部的节奏旋律越独立，那么它们的声音颗粒就越接近粒子，整体音响就越接近“粒子云”，音响画面就会越模糊。

② 《瞭望》(*Vues Aeriennes*) (1988)，12'30，为圆号、小提琴、大提琴、钢琴而作(commissioned by the Arts Council for the Nash Ensemble)。Paris：Editions Lemoine. (Premiered 1 December 1988 by the Nash Ensemble，London)

③ 选自 Tristan Murail：Target Practice Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 169。

第十一章 频谱音乐的配器原则

笔者在拙文《三维音乐参数》[1]中曾有个比喻："把和声学—复调学—曲式学看为不同的三维，它们建立起来的空间叫配器（配器被喻为立体的雕塑）。"由此导出"四大件"的紧密关系，它们的"合运动"构成了作曲这个本体。正因为此，在前面各章的分述内容中，我有意做了一点预留，就是担心写到配器领域时已经"无话可说"。因为前面各章的内容无不适合于配器，甚至可以说，它们就是配器，配器就是作曲。这无形之中为本章的写作增加了难度，还能总结出什么仅属于配器的原则呢？黔驴技穷，只能把分述于前面各章的组织原则作一个再提炼，换一个视角，愿能得到一片新天地。

杨立青先生在《管弦乐配器法教程》[2]第一卷第1页中说："在作曲技术理论的各项基础课程中，管弦乐配器法是与音响现象本身的物理特性及其运动变化规律联系最为直接的一门'科学'。"正因为有此远见，上海音乐学院率先于全国各院开设作曲"第五大件——电子音乐与声学基础"课程，它拓展了配器的外延，深化了配器的内涵，也为本文的研究指明了方向。频谱音乐的进步意义的主要表现之一就是"艺术与科学的联姻"，正由于实现手段与实验工具的不断完善才使得"管弦乐配器朝着不可思议的极限精致化发展"成为一种可能。"极限精致化发展"事实上是一个"极限认识的过程"。正如我在另一篇论文《音乐声学的凝视与困惑》[3]的结论所言："声音不是稳态的、静止的、封闭的物质，它的本质是一种变量、一种'流体物'，其中存在许多尚未认识的秘密，需要我们去继续研究。因此，对于声音我们需要有一种新的、开放的、自我修正的、不断探索的极限认识态度。一尺之棰，日取其半，万世不竭。对它的认识也必然永远地发展下去，深入下去……"

在此，本书或许提不出"新"的原则了，进而把工作的重心转到"极限精致化发展"的已有成果上去，以此作为本章将要展开研究的重点。所用前文成果将有另一层面的含义。

频谱音乐是追求音色导向的音乐，声音的还原与创新、音色的化合、音响的造型始终是其配器的中心内容。有鉴于此，有必要把本文前面涉及音色的相关内容做一个回眸，以便温故知新，引起注意。

影响音色的重要因素：

a. 发音体的材料质地不同：金属、人体、电子、木质

b. 发音体的激振方式不同：弦鸣、气鸣、体鸣、膜鸣

c. 发音体的激发位置不同：琴马、指板、胸腔、头腔

d. 媒介振动体的弹性不同：影响音色的始振特性和衰减特性

e. 共鸣体形状、结构不同：影响单元色的泛音结构及共振峰分布

f. 音源的波形与谐波分布

g. 声音的 ADSR 包络与时间过渡

h. 激振强度的不同引起力度变化（弱、强）影响音色

i. 音高位置、密度的不同

j. 演奏法的不同

11.1 ADSR 原则

11.1.1 起奏（attack）阶段

任何一种声音都有起奏阶段，但音色各不相同，因而起奏是影响音色的重要参数。有过采样器实践经验的人在做音色修饰、合成时有过这种经验，比如把钢琴中央 C 的原始采样的起奏部分截掉，按照百分比来提取后面 DSR 任何一个部分（每一个部分的切片时间持续不得少于 10 毫秒，这是识别音色的最低时间长度），把所得“切片”的音响放给钢琴家听，他也不敢肯定这是钢琴的声音。这样的实验，现在仅用电脑软件就能实现，这为声音参数的分析与实践提供了无限的便利，原则上，计算机可以进行声音任何参数的分析、任意切片、重组、合成任何的音响（旧的、新的、人间的、宇宙空间的……），只要能想到，就有办法能做到。计算机的功能已经不再是一种预感，而是给了我们实实在在的条件……一种认识事物、实现梦想的条件。一种具象性的手段。它放大了主观技术的维度。在音乐创造的整个过程中，提升了音乐作为“科学艺术”的含义。由此，大踏步地加速了声音世界的揭秘。

在声音的电子还原试验中，把影响音色的所有参数都恢复原始数据，也无法真实地还原声音，于是声音分析参数不得不再向深度进展——拓向空间、环境、噪音因素。也就是说，必须把空间、环境、噪音因素一起还原才能得到尽可能真实的声音。

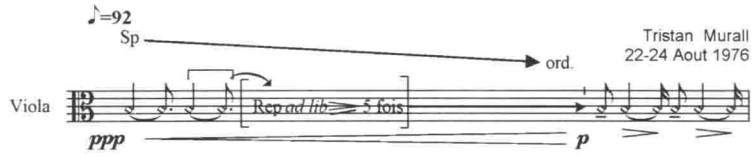
噪音除了在打击乐器组运用以外，一直以来都被乐音乐器排斥在外，认为它是干扰音，无用的音。尽管它事实上是存在的，但由于传统音乐创作是建立在“共鸣原则”基础之上，而把噪音理解为“非共鸣、抑制共鸣”因素予以排斥。只有到了电子合成时代才发现它是与音高、节奏、力度等结构力因素具有同等重要意义的声音参数，这些认识成果转过来又为现代音乐作曲家服务，促使他们在创作过程中越来越重视这种非共鸣的噪音因素，把共鸣、非共鸣、人工可调节共鸣综合起来，自由运用。频谱音乐作曲家在这个领域的贡献是显著的，下面就以噪音补偿作用作为研究的起点。

（1）噪音补偿作用

噪音通常是伴随着起奏一起出现的，有些来自于发音体本身（如长笛的口风音、弦乐的摩擦声），有的来自于环境空间（如背景音、静电噪音），在声音合成中通过人为手段还原这些噪音的时间过渡特性称为“噪音补偿”。

缪哈耶于 1976 年为中提琴创作了一部独奏作品《花园秘密》（*C'est un jardin secret*）[④]，这是一部约 4 分钟长度的作品，在作品的开始处（参见下列谱例），作曲家要求靠近琴马拉奏轻轻进入，逐渐增加弓的压力，拉出一种“摩擦弦的声音”，通过约 5 秒钟的持续，过渡到正常演奏位置。这里使用的就是典型的噪音补偿原理。

例 120：缪哈耶作品《花园秘密》总谱第 1 页



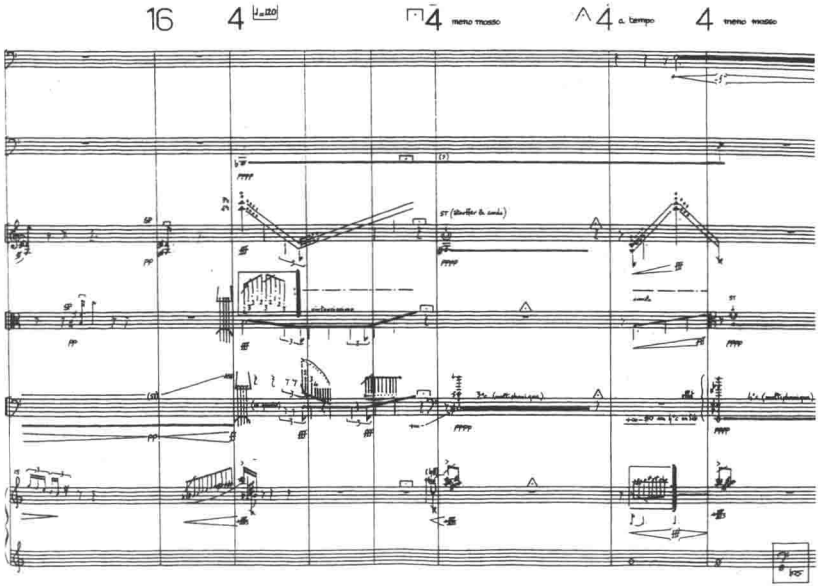
（Paris：Editions Transatlantiques）

诸如此类的运用在频谱音乐作品中比比皆是。需要指出的是噪音补偿作用，事实上在古典音乐中就已经广为运用（主要是用打击乐产生的噪音），只不过它使用的目的仅仅是为了烘托气氛、滋润光泽。对于打击乐的噪音成分并不是十分清楚。随着打击乐地位的提升，打击乐器的拓展，使得打击乐组在乐队的作用得到异常突出的加强。尤其是到了频谱音乐时期，打击乐音色成分的进一部揭秘，为各自不同的噪音运用提供了更明确的目的性和更多的可能性，能够更加清晰地去运用不同打击乐器（金属、皮、木制）的噪音属性去补偿管弦乐的频谱。自此，不仅打击乐，而且电

声、常规乐器的噪音成分都得到了最大限度的挖掘。

格瑞瑟在作品《时间的漩涡 I、II、III》（1994—1996）中多处使用噪音作为不同目的音响刻画的手段。

例 121：格瑞瑟《时间的漩涡 III》总谱第 109 页排练号 24



这里的弦乐器与木管都是作为钢琴的时间过渡作不同目的的噪音补偿。钢琴起到起奏强调的作用，这种起奏伴随着强力度及不协和和弦进行，形成了一种“爆裂声”音效，谱例根据钢琴的爆裂起奏及时间过渡性可以分为三个小片段（乐汇）。

第一乐汇（前三小节）：低音单簧管在极低音区吹奏一个背景长音，小提琴在 D、G 弦上从极限高音处向下泛音滑奏，再反冲上滑；中提琴、大提琴在系弦板与琴马之间以强力度的弓压，急速飞奔于四根弦之间。而后，同时上行滑奏至休止，形成整齐划一的分句，第一次时间过渡性就此结束。这个乐汇的弦乐与单簧管音响可以近似的看成“高斯粉色噪音”。虽然它们都有确切的频率音高，但是由于其急速频繁地变化，使其整体音响混为一谈，不知你我，从而成为实际的噪音补偿。

第二乐汇（第四小节）：同样是钢琴起奏后，弦乐、单簧管补偿，但处理手法已经不一样了。单簧管同前，小提琴采取夸张的极限压弓，在指板上演奏，增加弓的压力可以得到更低频率的音高，协和度降低，出现刮擦音效。理论上会出现低八度的音。但实际情况是，压力的扩展及弦的提升，我们听到的是比谱面音高低大七度又八分之一的音，同时伴随刺耳的

窄带噪音。大提琴采用泛音及加倍阻滞的压弓奏法产生复合音延长，增强整体噪音之中的“透色感”（在噪音中出现一种明晰的色带），而后再次行止句逗休止，第二次时间过渡性结束。

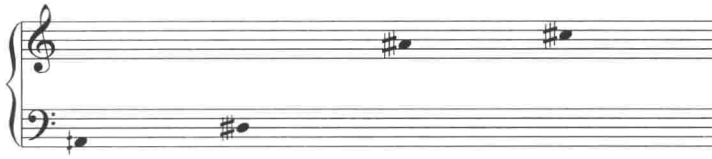
第三乐汇（后三小节）：又可以分为两个阶段，前一小节（谱例第五小节）为导入阶段，小提琴、中提琴滑奏，钢琴高音部循环引入，特别要注意低音部的“哑键泛音”，这个音实际上成为了一个基音，通过上方的振动激发它的谐波系列，表面上看起来，这里是线性化写作，实际上还是一种“混沌音响”，不过这需要仔细品味才能感觉到。低音长笛也悄悄嵌入式跟进，采用有意出口风的气鸣式奏法；后两个小节为主体阶段，中提琴、大提琴继续做钢琴的噪音补偿，钢琴在中途换到极低音区做“哑键泛音”，瞬间又改变了整体音效。

这里短短的七个小节，音色效果不停地更换，好似引领我们进入了一个万花筒式的世界五彩斑斓、眼花缭乱。事实上是采用了功放器放大的手法，让我们体会了平时不易察觉的微观世界。这里一件噪音打击乐器都没用，确写出了噪音音效，是为一奇！

说到噪音补偿功能，不得不说粉色噪音的金属打击乐器，像锣、镲、钹这些乐器，它们具有复杂的谐波系列，时间过渡性特征非常明显，ADSR 包络的每一个阶段都相当显著，频带范围也较宽，在非周期性模糊频谱中，穿插有周期性的波谱显现，所以可以使我们听到明确的音高，持续时间越长越听得清楚。只不过由于它的谐波分布不是简单的倍数关系，其中含有大量谐波失真，非线性频谱占了主导，故而音响整体是不协和的。乐器体积越大，音响越低沉、越不协和，起振时间越长（起振后达到最大振幅及衰减、持续、释音时间越长），所以金属打击乐器是噪音补偿作用最好的乐器。

要知道大锣这种粉色噪音的全部谐波分量是比较困难的，但是可以测出它的主要共振峰，而后以它为基础——作为载波，按照一定的调制比率（调制比率可以通过频谱取样分析）得到谐波矩阵，这个矩阵就是粉色噪音成分。缪哈耶在作品《寓言》（*Allegories*）中就是以这种方法来合成大锣的频谱，参见例 122。

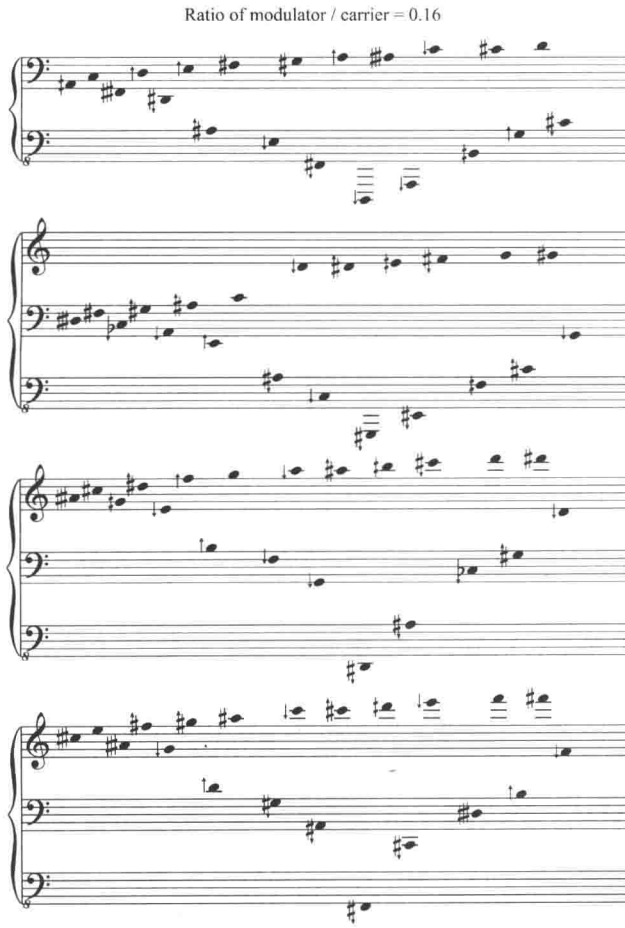
例 122：缪哈耶在作品《寓言》中以大锣的共振峰频谱为合成器载波



The Synthesizer's four carriers

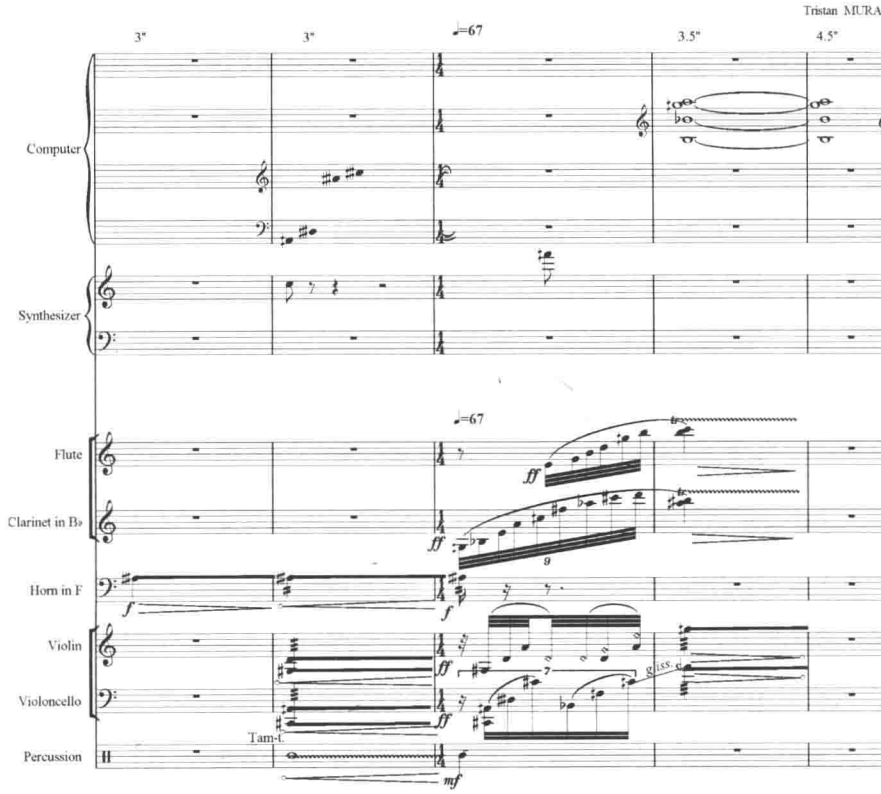
而后通过取样分析知道了调制比率为 0.16，按此比率分别调制上方四个共振峰频率，得到下列四组矩阵，这四组矩阵就是粉色噪音锣的主要谐波分音。

例 123：缪哈耶在《寓言》开始部分用频谱调制合成粉色噪音



有了这些谐波分量就可以人为地去合成锣的声音，时间过渡特性的每一个参数都力求还原锣本身的原始数据，能够用电声去合成，也能够用常规管弦乐器去合成。这样做的好处是什么呢？就是增加电声乐器与管弦乐器的融合度，让锣成为了一个“粘合剂”，天衣无缝地粘贴好由电声与常规管弦乐器的整体音响。这样，粉色噪音的补偿作用发生了根本性的转变，成为了结构力的决定因素，补偿变成了本质。参见例 124。

例 124：缪哈耶《寓言》[9] A 部分，总谱第 1 页



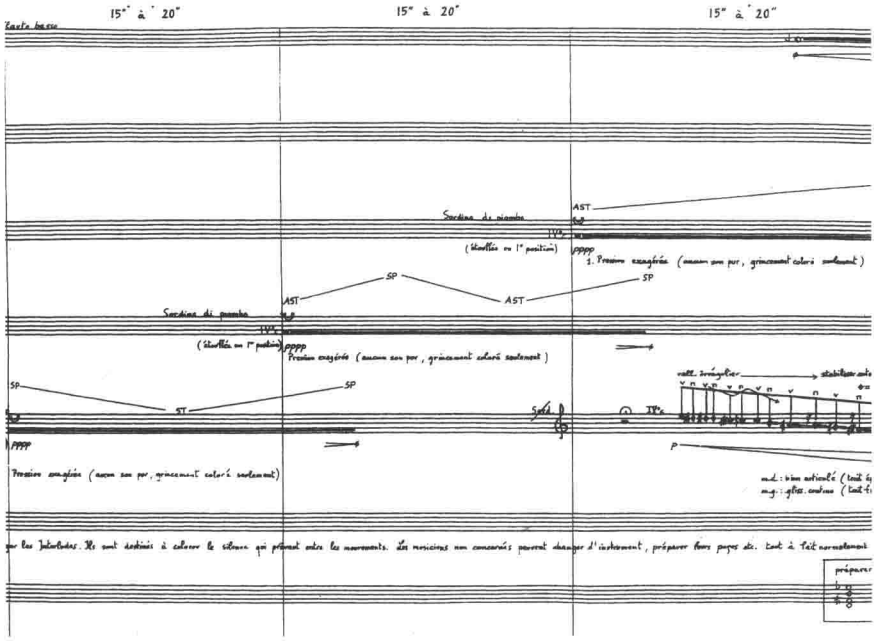
谱例中伴随着锣的滚奏，圆号（升$\frac{3}{4}$d）、小提琴（升 g—d^1）、大提琴（升 C—升$\frac{1}{4}$A）演奏的都是锣的共振峰音和倍频音高，也就是说强调了粉色噪音中的周期谐波分量。而后加入长笛、单簧管琶音上行，音高成分取自矩阵，电子合成器也从矩阵中提取和弦音，精确度达到八分之一音高，木管与弦乐精确度达到四分之一音高。这种手法成为了整个作品的创作基础，用缪哈耶自己的话来说：

> 锣及别的粉色噪音乐器从来没被作曲家正确使用过，要追求音乐的效果，把这种粉色噪音与乐队良好地结合，就必须知道它的成分。在作品《寓言》中，我要解决锣与乐队的结合问题——锣丰富的回声共振，如何使用频率合成精确的补充它的协和成分与音色。有一个可能，电子声音有丰富而精确的频率含量，而且它有确切的频谱调制成分（可以任意控制的成分），在乐队写作中可以充分利用，提高合成器与乐队的融合程度。[6]

（2）噪音主导作用

噪音不仅可以用来渲染气氛做补偿作用，还可以做主导作用，成为完全独立音响。还是在《时间的漩涡》这个作品中，格瑞瑟在 I－II－III 乐章之间各自加入一个间插过渡段，用噪音来过渡。参见例 125。

例 125：格瑞瑟《时间的漩涡 I、II、III》的间插段，噪音主导作用，总谱第 64 页



谱例中作曲家把小提琴、中提琴、大提琴的谱号都换成了打击乐谱号，加装弱音器，以加倍阻滞弓法在琴马和指板间来回摩擦。最后一小节大提琴才改用高音谱号，用加倍阻滞弓法在四弦上微分音下滑，向乐音导入。低音长笛嵌入式从无声开始气鸣，钢琴以哑键和弦做共鸣回应。这里的谱例选自第一乐章与第二乐章之间的间奏，在第二乐章与第三乐章之间的间奏也是同样的噪音主导作用，演奏法改为直接用弓拉奏琴马（总谱第 81 页，谱例略）。它们都产生一种轻轻的沙沙声，是典型的窄带噪音。

（3）噪音点状作用

皮质与木质打击乐器由于没有衰减（D）与持续（S）阶段，起奏以后立即释音。如果需要持续，必须采用滚奏才能保持，衰减需用力度控制才能实现。因而它们的音响非常短促，只能起“点状作用”强调音响的起始状态。这个属性早已经被广为运用。

点状作用并不是皮质、木质打击乐器的专利，金属打击乐采用煞音的

手法，钢琴不用踏板、弦乐拨奏，管乐单吐、弹吐都可以获得点状的音效，所以点状作用是一种普遍的、传统的运用手法，在此，无须谱例说明。无论是什么乐器组造成的点状作用，其目的都一样——为了强调起奏状态，强化音的颗粒性。点状作用也经常与具有持续、衰减明显的延长功能的音响混合使用，延长作为点状的补偿，点状作为延长的始触发。

11.1.2 DSR 阶段

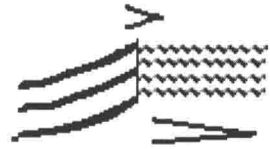
起奏是每一种声音都具有的特点，而衰减、持续、释音却不是每种声音都具有，参见第三章《音乐的结构力因素》“包络”内容，可知管风琴就没有衰减和释音阶段，而雷声没有衰减和持续阶段，起奏达到最大振幅值就直接释音。同样，还有许多乐器通过特殊的演奏法也能改变 DSR 包络属性，比如上面说到的点状作用，断奏、拨奏、煞音、闷击、加倍阻滞弓法、超吹，等等，事实上它们是改变了声音的时间过渡属性，从而抑制了谐波分量，达到改变音色的目的。这些手法不仅可以在单件乐器上实现，还可以在不同编制的乐队里综合使用，形成具有立体凹凸感、动态鲜活的生命体。

同样在《寓言》这部作品中，缪哈耶根据不同声音的时间过渡性频谱特征，给作品的织体做了提前预制。他先把织体分为下列几种形式：

（1）火箭起奏至共鸣和弦

这种声音状态由于起振时间特别短促，马上到达最大振幅只有 AS 阶段，如管风琴。

（2）中度起奏至共鸣状态

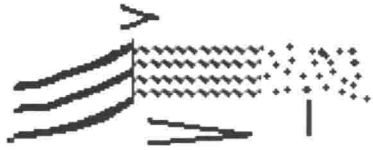


这种声音状态起振达到最大振幅的时间要相对慢一些，紧接衰减，而后进入持续共鸣阶段，再自然消失，即具有 ADSR 全阶段。如长号。

（3）慢速起奏至共鸣状态

这种声音状态起振至最大共鸣振幅时间最长，缓慢进入缓慢消失，同时具有 ADSR 全阶段。例如大锣。

（4）起奏至共鸣立即溶解成粒子云



这种声音状态起振至最大振幅时间不固定（有快有慢），衰减进入共鸣以后立即进入粒子云的释音状态，交混点状，分不清层次，主要是电子声音。

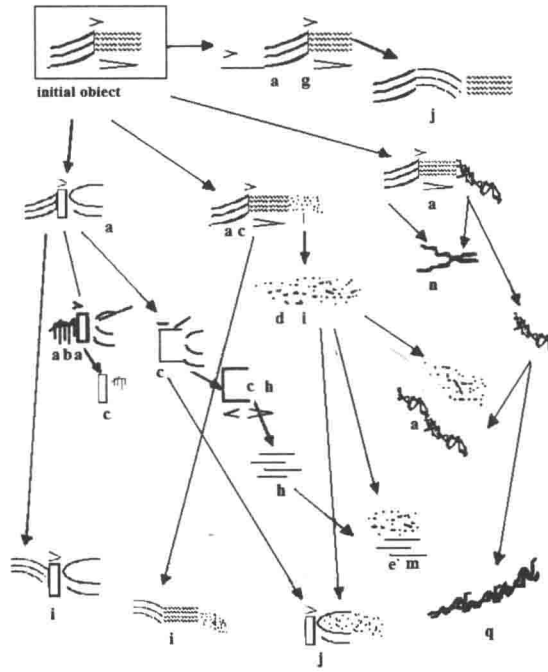
（5）起奏至共鸣而后遭到破坏（分解）成为螺旋纠缠的旋律（麻花绞旋律）

这种声音状态 ADS 三个阶段都与前几种一样，不同的是释音阶段变成了螺旋纠缠式的麻花绞旋律，使得频谱极不协和。这种声音状态也主要存在于电子音响中。

我们知道现实生活中的声音状态绝对不止上面列举的五种情况，应该说除了起奏不可缺外，其余的 DSR 阶段，任意缺一，或是同时缺两个，甚至三个阶段的声音状态都存在。如果进入粒子包络环境，情况就更加复杂，因为粒子包络有五个参数同时起作用，可见现实世界还有许多声音状态期待我们去开发利用。有了频谱音乐作曲家开拓性的思维启发，我们作曲的视野必将更加宽阔。

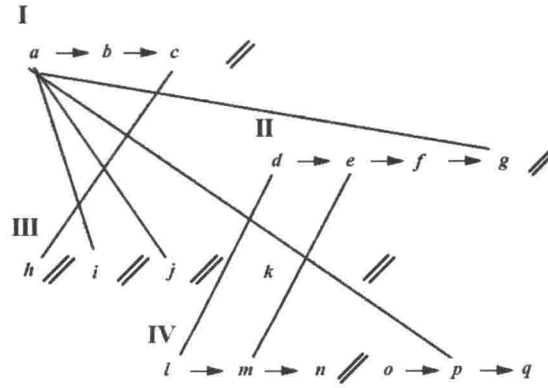
缪哈耶利用上面的五种织体形式预制了《寓言》整个作品的织体结构，参见例 126。

例 126：缪哈耶作品《寓言》织体预制序进图



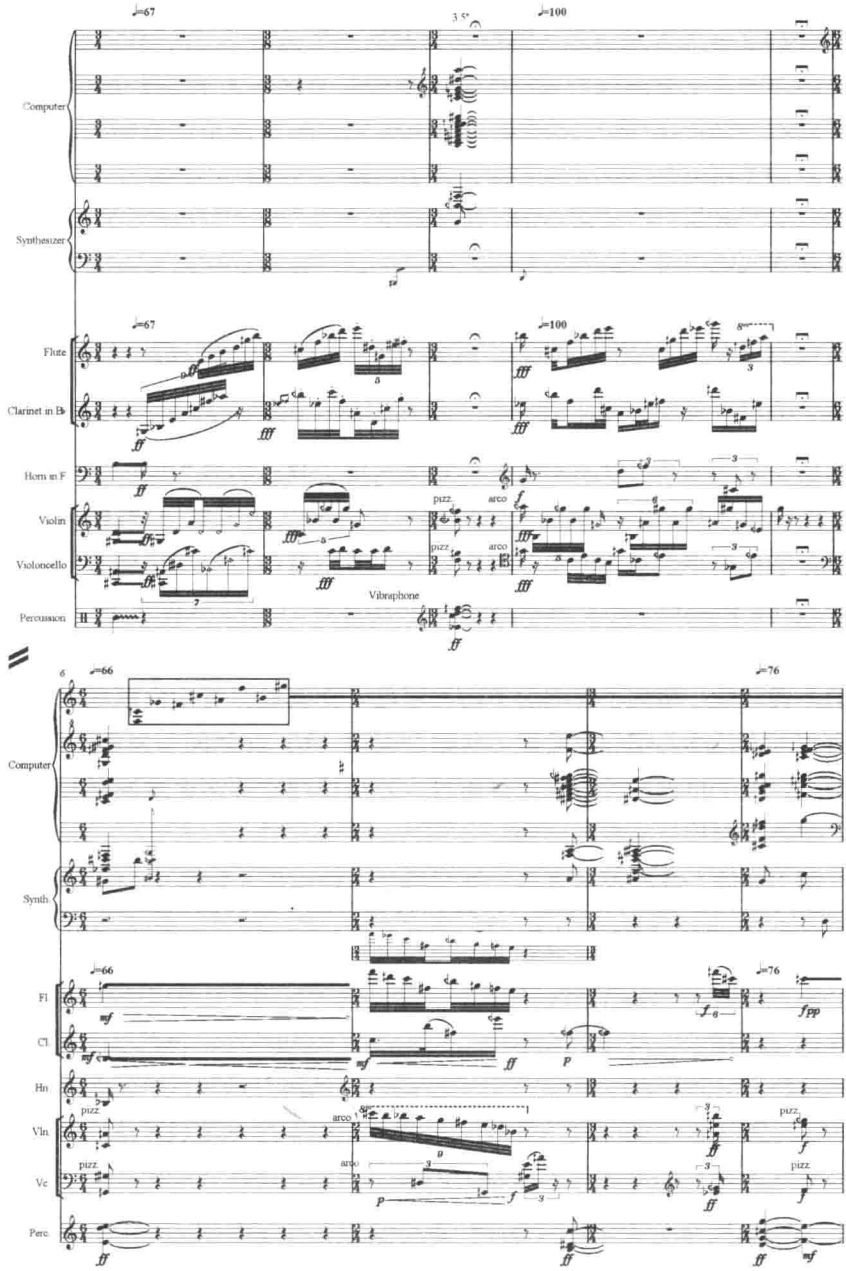
图中 a、b、c ……表示织体组合类型，整个作品采用协和序进原则来宏观布局，作品共分为四个大部分，参见下面曲式结构图。

例 127：缪哈耶《寓言》曲式结构



图中 a、b、c……q 表示作品排练序号，箭头表示由一个部分进入另一个部分，双重线表示乐段终止，虚长线表示织体关系。在上面的织体序进中，使用了镜像对称，倒影、逆行、倒影逆行、原型等手段，最重要的还是协和序进原理的运用。

例 128：缪哈耶《寓言》第三部分，排练号 h 处 1—8 小节



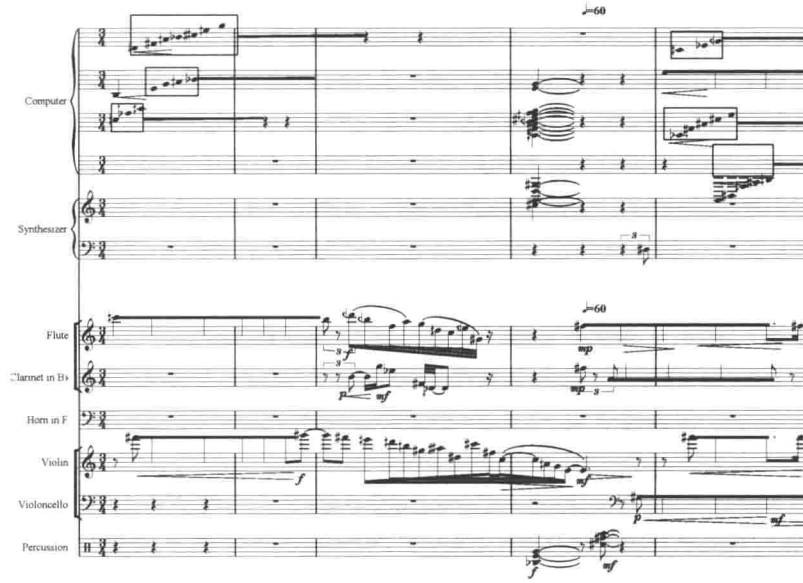
通过本例及例 124 作品的开始部分（A）的谱面织体对照预制织体，可以求证作品的织体布局完全是按照预制图示进行的这个事实。作品 A 部分开始就是“火箭起奏至共鸣和弦”，共鸣和弦由于在电子合成器与非电子乐器使用的量化精确度不同，可以近似的把非电乐器看作倍频和弦，电子乐器看作间谐波和弦，这种音高上存在微差偏离的和弦结构形成一种特

殊的音响方式，根据和弦密度的浓淡来调节协和的程度。这种手法贯穿于全部作品之中。

在本例中，排练号 h 为第三部分的开头，前一小节至 h 是起奏阶段，做了短暂停留衰减，而后进入共鸣和弦持续阶段，特征同前。而后再进入分化的释音阶段至一小节完全休止，上行谱（a）（h 的第 1—4 小节）生命状态的第一阶段——由生至死，完全结束。

下行谱例（b）部分（h 的第 5—8 小节）是另外一种声音状态，先由乐队全奏强调起奏阶段，弦乐、铜管、MIDI 键盘、合成器都做点状支持，由木管与电脑软件控制音响持续，合成器及 MIDI 键盘再做和弦补偿延长。注意：谱例中电子声部的一个音，并不是非电子乐器一个音的概念，它是指由这个音控制的一种效果器，只要触发这个音，就有相应的预制效果出现。这里最有特点的就是第一行谱例中出现的“粒子云”，根据协和度的疏密要求，紧张不紧张的布局安排，粒子云的音高可以用倍频音高，也可以用旁频、间谐波音高，甚至于还可以用完全“新的声音频率”。不管用什么音高，已经分解化的粒子云其共鸣都非常弱，这事实上提升了复杂频谱的不确定性，增加了音响的不协和程度，使其整体音响向模糊迈进。而后衰减进入持续共鸣和弦阶段，共鸣和弦由（b）部的同步发展到（c）部的异步，电子声部的粒子云相伴而行，其中伴随有许多失真频谱和谐波衍射，使整个过程越来越不协和。

例 128 续：缪哈耶《寓言》第三部分，排练号 h 处第 9—13 小节



从谱例中可以看出，古典配器中的重叠覆盖功能已经被废除了，即使这个原理还在使用，比如电子声部的和弦旋幅与非电子乐器的和弦旋幅存在音域重叠，但是音高却尽量不重叠，尽管它们同步一起发声，也因为其音高各自不同而使得覆盖功能名存实亡。由此可见频谱音乐拒绝完全的清晰！

11.2 协和序进原则

协和与不协和问题及它们的序进原则，我们已经在本书的多处讨论过了。在此再度提及足以见这个原则的重要性，前面我们多是从技术、物理的角度来研究协和原则，现在我们稍微把视角做一个调整，从这个问题的心理认知、听觉感受切入，而后再回到技术、物理层面深入探讨这个问题。

首先我们设问：为什么要从音响之中去鉴别协和的界定呢？为什么新音乐一定要那么不协和？

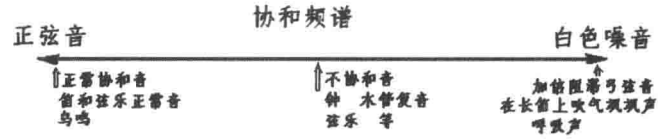
要对这个颇为麻烦的问题作出令人满意的答复是非常困难的，因为音乐里的不协和音纯粹是相对的东西。在你听来不和谐的东西，在我听来却可能相当悦耳。西方音乐的全部历史表明，我们的听觉能力日趋增长，以前听来极不协和的和弦，现在听来却感觉悦耳宜人。那些蒙特威尔第和瓦格纳时代被视为罕见古怪的和声，被后来几代的普通音乐爱好者视为通用的手法。我们的时代加速了这一历史的进程。因为如今任何和弦，无论它不协和到何种程度，只要作曲家认为它的音响是“对头的”（指表达感情或特定的音响氛围而言），并能与整部作品糅合在一起，就被视为是可用的。从听众的角度来说，不协和是按照“不适应—适应—不满足—渴望创新”循环往复不断提高，作曲家则把它作为表达内心感受的一种最有效的手段。我们所受的文化训练正是按照这种轨迹，循环提升。协和鉴别的天平也就不断地向噪音领域倾斜，这是人类认识发展的必然，是社会进步的标志。时至今日，通过一个单一的声音信号很容易鉴别它的频率分布。反之亦然，通过频率分布很容易鉴别它的声音。人们可以利用协和（谐波）的效率去日益细微地分辨声音。反之，利用人们已经掌握的谐波去创作音色。局部轻微的差异都是界定声音的重要依据。比如声音振幅的变化，频率的关系，音质的差异，等等。因此就存在一个协和音色的统一体这个问题，这个统一体如何建立？这就必须要事先有一个组织原则，在音乐中就是协和序进原则。尽管这个原则还没有天下大同，没有形成统一的标准，

但是它却是每一个音乐作品组织形式的终极原则，是每一个作曲家包括听众创作和欣赏音乐的最重要的准绳和标准。它的具体的表象，一千个人就有一千种标准，同一个人在不同的时间、地域下，随着社会阅历和自我修养水平的不同，这个准绳的判定标准也会不同。这正是音乐作品之所以千姿百态的根本内因之一。但是为了便于理解和掌握这个动态的、发展中的判定标准，我们还是需要一个一般意义的、相对静止的判定标准，以便能异中求同，把握时代风格的发展脉络，这也正是前面几章对于协和序进领域研究的主要内容。总之，协和界定是一种动态的、可变的、相对的概念，没有离开了环境氛围、孤独存在的绝对协和界定标准，它需要我们实时修缮、不断提高、自我超越。

下面就来研究频谱音乐作曲家如何个性化地处理这一协和界定原则。前面已经就格瑞瑟的经验："第一，先去建立一个游戏规则"；缪哈耶的方法："从光滑的频率到粗糙的频率，从周期运动到非周期任意律动"有过介绍。下面我们来看看后频谱作曲家卡尔嘉·萨瑞拉禾如何运用这一原则。

卡尔嘉·萨瑞拉禾于1982—1984年在IRCAM做研究员期间创作了她的第一部主要的管弦乐作品《威伯林根》（*Verblemhmgen*）[7]，在创作中，她提前预制了一个"音响协和轴"作为整个作品的音响逻辑依据。参见例129。

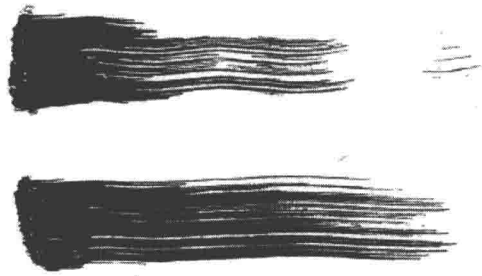
例129：卡尔嘉·萨瑞拉禾设计的"音响协和轴"[8]



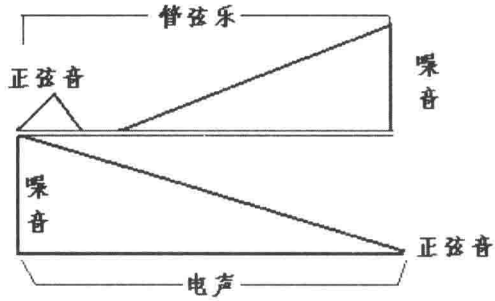
在这个音响协和轴中，作曲家把不同的音响做了规定，最协和的音响为正弦波形音，把不协和的界定划在木管复合音与弦乐（和弦）音上，尽管弦乐具体为什么样的和弦，她没写出来，但是通过轴的阶段划分与序进，我们可以感觉到它应该是与木管复音一样的多音和弦，弓法是介于正常与加倍阻滞之间的力度；白色噪音是由噪音演奏法产生的音响，由于打击乐器的音响效果已是众所周知，所以音色轴上未有反映。这个音色轴的设定完全反映的是一种个人的秘方，无所谓别人认不认同，自己决定了游戏规则，去贯彻执行即可。通过计算机的辅助，把音响变化过程，变成了一种"视在频谱"，可以量化的过程。把声音作为一个形象，音色只是这个形象的频谱反映。同一个声音源，它的频谱本不是唯一的，在写作之中

需要一个相对稳定、相似的、易于理解的语汇去刻画这个声音，这就是预制“音色协和轴”的根本原因。图中协和的基础绝大多数是建立在显而易见的频谱特性之上的，也就是说，完全按照声音生态学的态度，取自于声音本身的属性来确定协和的基础。在研究这部作品之中，惊奇地发现作曲家把频谱离散图与中国的书法联系起来了。确实书法讲究的灵性、风骨和品格，透出的神采气韵、着力点及其整个过程的虚实相间，力透纸背，落地生根，绵延不断，一气呵成。无不与声音的频谱图及时间过渡特性相吻合，从精神到气韵，从表象到内质美感真是天人合一。我真是汗颜！在我们未肃清崇洋媚外、数典忘祖嫌疑之际，国外艺术家却自如运用中华文明精髓，不仅能把当代先进的科学、艺术与东方艺术融合，而且能提出“音乐的决定因素不是技术，而是指导技术使用的原则、思想和观念”这种真理，这分明就是中国古代哲学提倡的由为学至为道的思想体现。以无形为有形，以无法为有法，我们尚需努力！

例 130：卡尔嘉·萨瑞拉禾设计作品《威伯林根》的第一个曲式草图

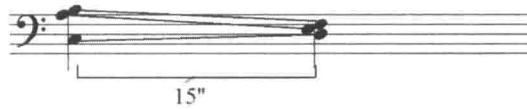


由图中我们清楚看到，作曲家只画了上下两笔，起奏—衰减—持续—释音的全部阶段都体现出来了。作曲家把第一笔的生命的过程逆行过来，安排给管弦乐器，由最协和的正弦音开始进入，而后以一种难以查觉的静态旋律慢慢滑向噪音，最后形成密集的织体。相反，而把第二笔安排给电子部分，电子部分是以密集的噪音开始，慢慢地变得清晰，在末尾变成协和频谱。整个作品事实上成为了一种噪音与纯音的对位。



这个作品就只写一种生命过程，静态的、难以察觉的变化充分显示了萨瑞拉禾超常的定力，这种气度高雅、清淡寡欲的定力成为她创作的主要特征之一。参见第七章《频谱音乐的和弦建构》之7.1《倍频和弦》例75，我们就能知其一二。这部作品与萨瑞拉禾1982年在IRCAM创作的第一部电子音乐作品《无韵诗》（*Vers le blanc*）有很大的关系，在电子音乐作品中，她已经实验了这种静默的变化，以协和序进原则，慢慢地调整共振峰频率的音高及带宽，改变相位、力度、振幅，改变调制百分度的比率等参数，使得最终音响以一种听觉感觉不到的变化静默挺进。这部作品的基本思想就是追求朴实、简单的进化过程，追求“无形的幻想”和“无呼吸”的声音”[9]。整个15分钟的作品，竟然是从一个三和弦慢慢滑行到另一个三和弦。参见例131。

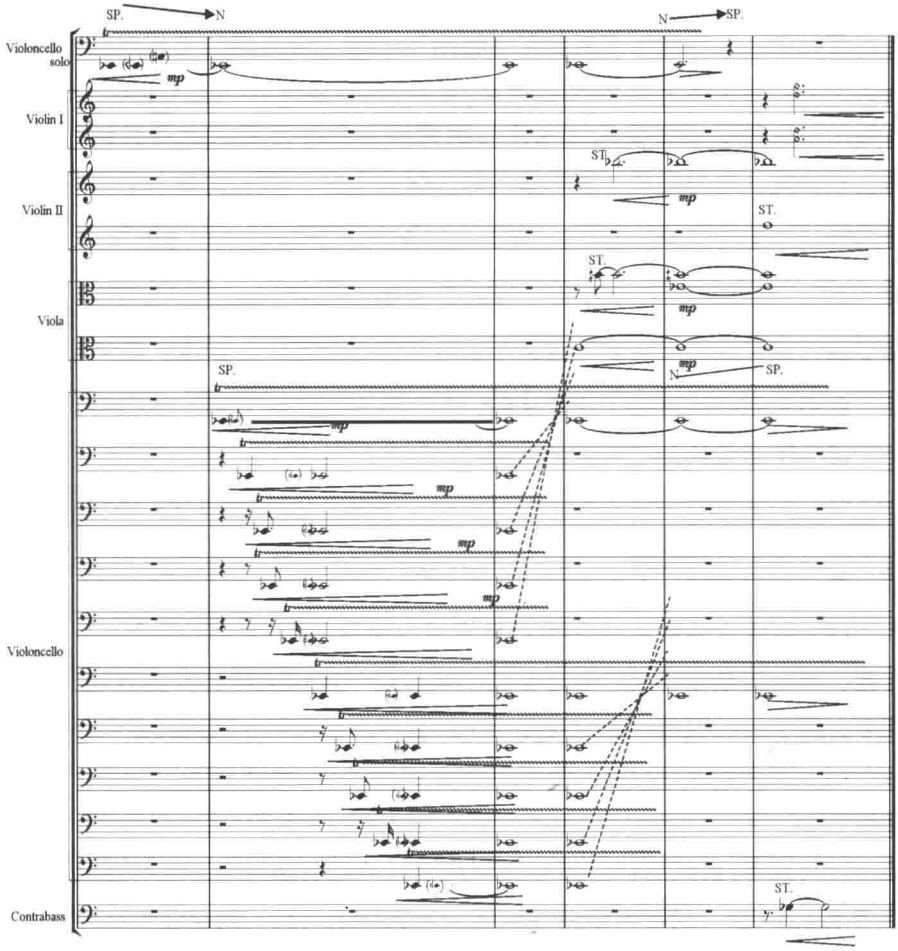
例131：卡尔嘉·萨瑞拉禾为磁带而作《无韵诗》，开始与结束的和弦布局



协和序进原则既可以对作品进行宏观控制，又可以作为微观协调的依据；既可以对作品的纵向结构（比如和弦结构、织体组织、谐波分布规律——上密、下疏、中不空的泛音分布）作出规定，也已经成为了时间过渡、曲式结构、音色节奏等因素横向特征方面的最重要的逻辑基础。它事实上是音乐作品组织结构的终极原则。

协和序进原则对于作品纵横组织结构的控制，本书已经作出了多个实例说明，下面再增加一种在单质音色中，使用一个相同的音，通过密度的疏密变化来达到增加协和度紧张性的手法。参见例132。

例132：卡尔嘉·萨瑞拉禾作品《烟》[10]（*a la fumee*）总谱第1页



不难看出作品是以一把大提琴独奏降 E 开始，一小节以后，使用单质音色（还是大提琴组）分布为十个声部相继模仿，由第一至第十采用相同的演奏法（指颤音），逐渐增加了降 E 的浓度，而后再自五到一，自十到六作逆向收束引出同质弦乐组中提琴、小提琴 II、低音贝司、小提琴 I 的谐波分音，这种引入方式非常有意思，极其静默，音色过渡非常缜密。假设取消大提琴组的分奏，而采用弦乐组同时或异步进入，那么这个音色过渡就要突然得多，独奏音色与合奏音色会形成突置对比，整体音响逻辑就会逊色不少。这里大提琴组的分奏起到了大提琴独奏共鸣箱的作用（人为制造了一个可以扩音的共鸣箱），使其音响最终按照“独奏—单质音色—同质音色”的逻辑序进，并同时采用“单音—逐渐加密的单音—分音合奏”的密度逻辑，伴随音区的扩展，形成了一个典型的频谱音乐增长方式。这个增长方式本身就是协和序进的最好证明。

单音增长，自20世纪中叶贝尔格在歌剧《沃采克》中运用以来就广为作曲家推崇，发展到后来甚至有“滥用”之嫌，像本例这样用出新意的还确实少见。格瑞瑟于1974年在罗马创作的大型管弦乐作品《起源》的开始也用的是这种手法，他先以木管与铜管组分别按顺置（由高音到低音乐器）和倒置（由低音至高音乐器）依次演奏中央A音，并保持且做力度的增减变化，像是在调管校音，而后再交给弦乐组校音。整个乐队“乱作一团”，这事实上就是真正的校定标准音效果，整个音响持续约一分钟，突然打击乐组与再次进入的木管、铜管一起闯入，一声狂啸，戛然而止，引出木管与弦乐的和声音效，观众才如梦初醒，原来音乐早就开始了。

此类实例俯拾皆是，这里从略。

协和序进逻辑判定的重要参数：

（1）以和弦的级数关系、音程含量、对基音的偏离度为参数标准。例如倍频和弦、旁频和弦、间谐波和弦，对基音偏离度越大越不协和，参见第一章《频谱基础》中协和度的划分。

（2）以密度的浓淡变化为参数标准（密度不仅指音高概念——单音、音程、和弦的叠置情况；也指音色、节奏值、发音点数、力度强弱、变化频率、粒子云的容量、粒子间隙等一切有浓淡、疏密变化的声音因素）。

（3）演奏法对协和序进的影响，比如乐音演奏到噪音演奏，反之亦然。

（4）谐波分布特性对协和序进的影响。比如音色轴，由周期频率到非周期频率，由粗糙频率到协和频率。

（5）音色对协和序进的影响，单质音色—同质音色—异质音色；纯音色—混合音色；亲缘融合—分离效应。

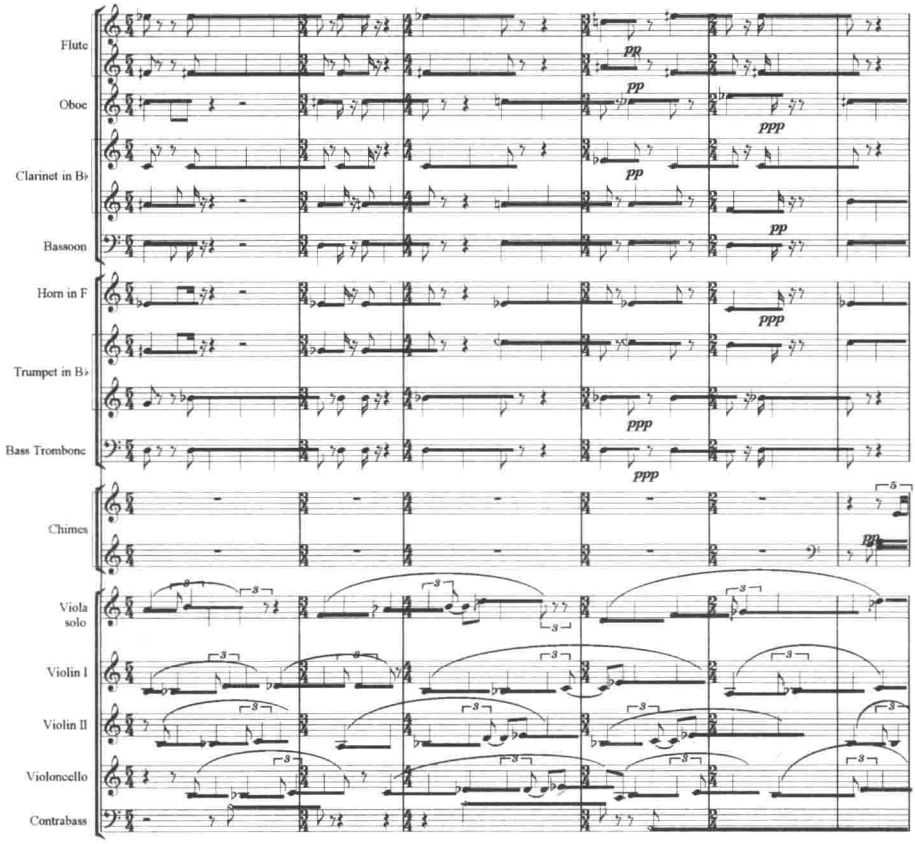
（6）旋幅带宽对协和序进的影响，通常情况下，宽带比窄带更不协和，低音区窄带又比高音区窄带更不协和。

（7）力度对协和序进的影响，强力度比弱力度更不协和。

（8）织体因素对协和序进的影响，单一因素的织体（Solo）—同质性织体（Soli、tutti）—异质性织体—高度综合复杂织体。

音乐不言绝对，上述因素万不可绝对理解。而且它们很少单独运用，更多的情况是综合作用于作品的协和序进逻辑布局之中。下面我们以较为宏观、综合的眼光再来研究几个作品片段的协和处理方法。

例133：马克·安德烈·达勒巴维《王冠》（*Diademes*）总谱第9页



作曲家在这里是利用直达声与反射声构成的延时异质复调织体，并通过木管、铜管的染色、强化作用来增加各声部线条的密度，进而达到不协和性增长的目的。

谱例中，独奏中提琴声部为主要声部，第一、二、三小提琴及低音贝司成为独奏中提琴的共鸣箱，用不同时差的反射声做延时混响处理，整个弦乐组形成同质音响连贯进行。有趣的是这里木管、铜管的处理形成异质性的染色作用，铜管主要以点状支持为主（两只小号偶尔做踏板音延长），分别去强化直达声（中提琴）与反射声（小提琴 I、II、III）的音头起奏；木管组按照软、硬音质区分，演奏分音，构成弦乐组的和声延长。

软音质：FI1＋FI2＋CI1　　硬音质：Ob＋CI2＋Fag

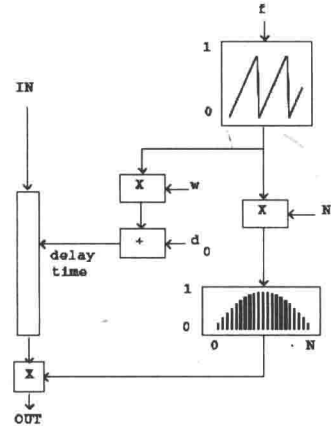
CI2 软化了两个双簧乐器硬的属性，起中和作用，软—硬音质交替对弦乐组进行染色，最终使整体音响成为异质音色交替作用。

这种音乐本质上来说是在微观与宏观、音色与协和、分裂与融合、声学与电子之间创造一种动力性的基本对位法，使其不同于传统的意义。而

且它真正的兴趣在于结构的联系与冲突，运行的区别与转化，规范与全球化，所有这一切显示了具有的有限必然的形式和潜质。

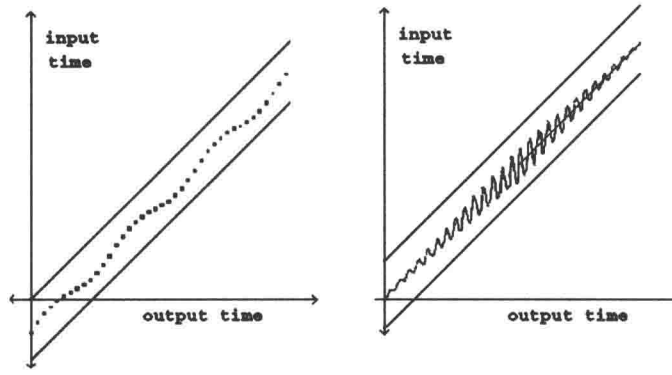
对于延时混响造成的模仿复调织体有必要再做一点声学说明。参见例 134。

例 134：延时混响原理电路简图[12]



图中 IN 表示输入信号口（相当于一个声音触发器），F 为锯齿波控制器，把锯齿波分别输入 W、N、D 这些效果器之中，用它的包络变化值来控制延时时间和音高提升等参数，通过效果器作用之后，从 OUT 输出调制后的合成信号，这样我们就能得到我们预先设定的，“任意目的”要求的延时混响音响。比如我们要把直达声变为匀速运动颤音效果，只需把音高包络设定在一定的音区范围，用恒定延迟时间值控制就可以得到，参见下例颤音效果图（A）；如果把时间间隔和音高包络任意一项调成变量（或是两者同时调成变量），我们就可以得到变速颤音（B）。

例 135：恒定匀速颤音与变速颤音

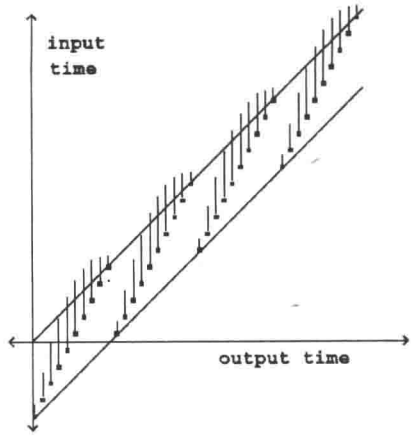


A. 匀速颤音　　B. 变速颤音

如果改用方波与三角波来作为控制器，由于方波、三角波都只存在奇数泛音，偶数泛音全部丧失，我们就可以得到时隐时现的哇音效果。同样道理，如果以脉冲波作为效果控制器，由于脉冲波可以人为设定占空因数的数比关系，谐波的丢失缺项状况可以任凭主观意念决定。所以最终得到的音响效果会更加自由，也更加复杂。事实上，现代电子仪器能够把原声改变成难以想象、无以计数的音响造型，且配有不同的音响效果，只有想不到，没有做不到！

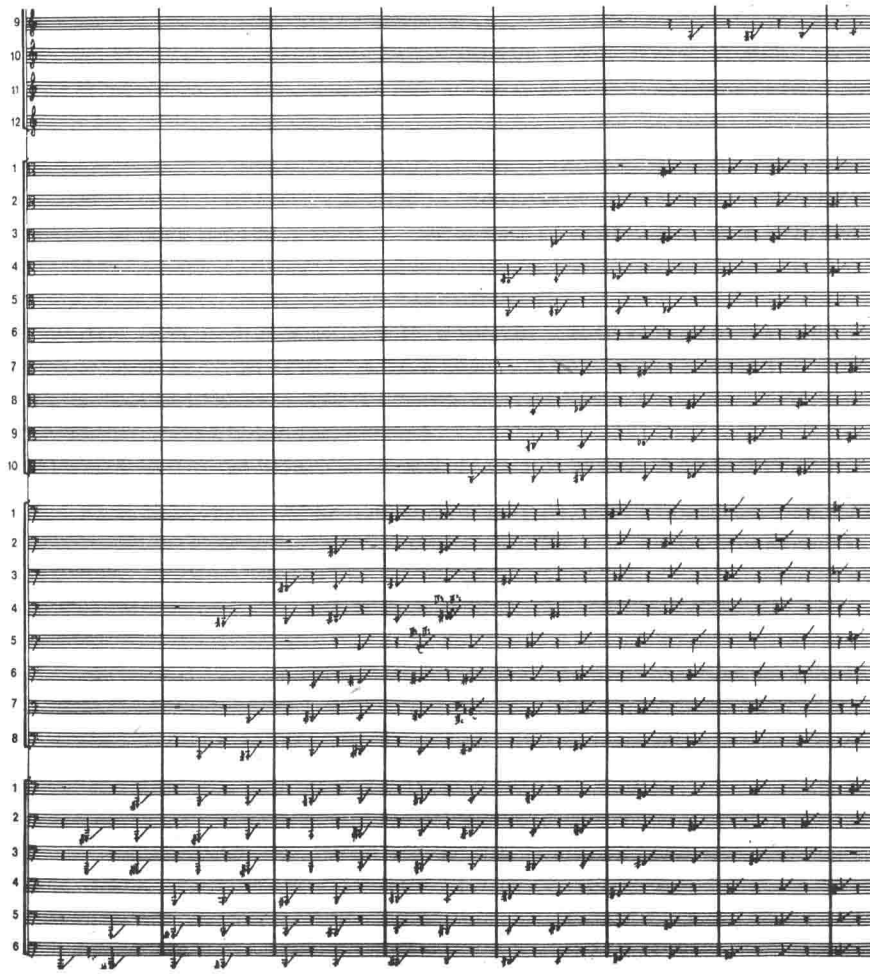
下图为分段性延时功能，每一段中有十个等距离的发音点（比如看作粒子），可以把第一个点（粒子）理解为原声（直达声），后面九个点（粒子）理解为它的延时回声（反射声），十个点（粒子）构成了一个粒子云；更大一级的单位粒子云之间又形成延时混响，分别以前一个粒子云的第六个点（粒子）为起点，依次向上做恒量移动，这样，最终就会得到下图这种“马的牙龈”（the bars）一样的包络线条。

例 136：分段性延时功能·马的牙龈包络图[13]



格瑞瑟在 20 世纪 70 年代就悟出了这种电子原理之精髓，并把它直接借用到管弦乐写作之中，丰富了管弦乐织体的呈现样式，达到了很好的协和序进递增效果，参见例 137。

例 137：格瑞瑟《起源》延时处理，总谱第 31 页弦乐组部分

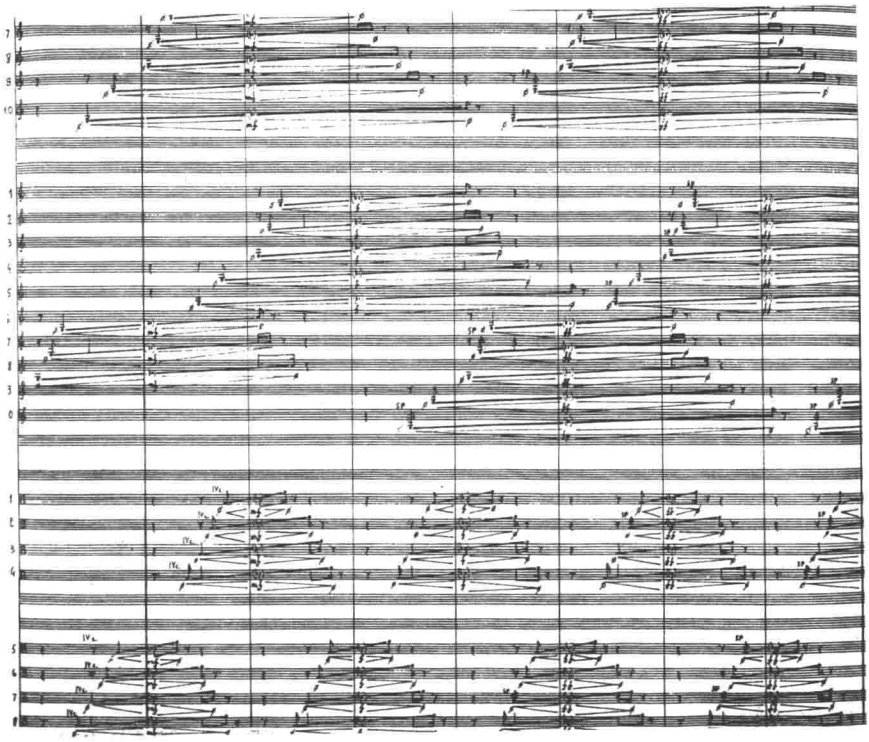


作品先由第六把低音贝司触发一个音（G_1），而后按照自然数列形式递增演奏的声部和密度，纵向音高逐渐聚合为十二音音块，采用延时混响的复调模仿（直达声—反射声构成的横向可动蟹型对位），逐渐增加密度，最终形成一个同质音色协和序进的增长过程。

这个增长过程主要使用了织体增长（从单质到同质叠加）、密度增长、旋幅带宽增长、延时混响及分音叠加等技术手段，也可以把它看成由粒子变成粒子云的过程。

下面再来研究本作品 24 页弦乐部分的协和序进。

例 138：格瑞瑟《起源》协和序进，总谱第 24 页弦乐组部分



这个片段的织体安排非常有意思，作曲家把弦乐组细分为每人演奏一个“独立声部”（由于乐谱过大，谱例只是局部扫描），自上而下分别是小提琴Ⅰ的6、7、8、9、10分部，中间为第二小提琴的1、2、3、4、5；6、7、8、9、10分部，下面为大提琴的1、2、3、4；5、6、7、8分部，中提琴没有进入。从谱面可以看到，每五把小提琴形成一个自下而上梯形滑奏的“粒子云”，大提琴组为四台琴一个梯形单位，梯形面积要比小提琴的梯形小，即变化频率大提琴组比小提琴组要快。并且作曲家要求梯形演奏自左而右的触弦点要从正常位置逐渐滑到靠近琴马（SP.），各声部的音响都从“光滑的频谱到粗糙的频谱，从周期频率到非周期频率”完成乐音向噪音的过渡。谱面给我们的视觉冲击是前呼后拥、你赶我超的繁忙场景，由单一的粒子汇成小的粒子云，再由小的粒子云聚合为大的粒子云，从而形成整个音响的协和序进增长过程。

仔细观察谱例会发现，原来所有的声部线条，无一例外都是在演奏由g—a^1的大九度滑奏，仅仅是进入的时间与滑行的速度不同而已。既然是同样的音高过程，为什么作曲家还要不厌其烦地分出数十个声部记谱呢？这就是前面已经介绍过的粒子与粒子云“树叶与树”的关系问题，这里不再赘述。

滴滴溪水汇成江河，其音响的动态令人称奇！

这里的协和序进增长过程主要使用了密度增长、演奏法变化、单质与同质音色对比、相位差、延时混响等手法。

众多当代作曲家在其学术前沿的音乐作品中不断出现新奇复杂的织体形式，有的作曲家甚至把作曲文本变成了一个视觉艺术品。事实上，这都只是表象，我们千万不可被这些表象所迷惑，只要平心静气、淡定自若，慢慢就能悟出作曲家藏于谱后的逻辑依据，找到作品真正的结构原理，再来看这些作品的总谱，就能去伪存真，追本溯源，透过现象看到本质。原来谱面的因素并不复杂，有许多层次都是从单一因素发展而来，是种子的发芽，生命的环境，其逻辑依据显露无遗。

11.3 模糊原则

通过对前面几章内容的介绍，我们已经对频谱音乐有了深入的认识，它是一种最接近科学的作曲方法，是以声音生态学的态度，客观、现实地揭示声音本源的特性，是对声音的极限认识所取得的阶段性重要成果。所有这一切似乎都与模糊扯不上边，它的全部特征都是以模糊的反面精确、清晰、具体、客观来体现的，怎么可能模糊呢？模糊与精确本是二元对立的两种思维方法。模糊思维主要依靠定性分析，从整体上认识和把握事物，具有更多的感性色彩；与之相对照，精确思维用精确的、数字化的指标分析事物，是以定量分析为基础的纯理性思维。两者之不同显而易见。

事实上，这已经陷入到绝对化的泥潭之中。不错，模糊与精确（清晰）是有二元对立的一面，但它们还有统一的一面，是对立之中的统一。宇宙之间不存在离开清晰的模糊，反之亦然；只有模糊中的清晰，清晰中的模糊，如花中蜜、水中盐，于无处见甜咸，于模糊中见明朗。模糊与清晰（精确）本来就是不可分的一体两面。而音乐艺术正是这种模糊与清晰（精确）；理性与感性高度融合的矛盾统一体，作为术科的作曲“五大件”都是科学，所以它们主要讲授的皆为规范、定理和已经为世界普遍接受的一般规律，是经过一代又一代人精益求精、严谨推理的理论成果。毋庸置疑，我们必须学好、掌握它们。但是仅仅掌握它们，学会照葫芦画瓢是远远不够的，这充其量只能做个匠人。然而音乐更是艺术，艺术有自己特殊的无为无形的地方，它们根本无法量化，不可表达，未可规范，不能捉摸，难以言喻，有如鬼斧神工，要达到这无为无形之境，经常不是人工巧谋可得，不是人为可以传授，也不是只花上时间便能成功的。靠的是人的

艺术底蕴、文化功力和对人性的深刻领悟及敏锐的艺术思辨、灵性，而非匠们所能企及。

艺术有规律却又不能只有规律，僵化的教条下只有死去的作品，艺术唯有创新才有生命的辐射力，于是寻找更新、更深的表现手法，出人意料而在情理之中，便成了优秀作品生长的基础。好的作品各有其妙，妙不可言，这就是无道。作曲既是科学，更是艺术，作为艺术可以模糊；作为科学，必须严谨，两者相辅相成，相得益彰。我们学习和掌握精确、细致的手段是为达到模糊的效果。音乐作品的最终音响应该是在创造一种朦胧的虚实相映、形神兼备、气韵生动的美，把欣赏者带入一种妙境之中，使其去想象、思索、玩味。所有具象、精确、清晰的美反倒会逊色不少。

那么什么叫“模糊”？

模糊是主体在从事艺术审美与创作活动中的、与精确相对立的以模糊性为特征的一种思维方式（意识感觉）。德国哲学家康德认为“模糊概念比清晰概念更富于表现力”[14]。当代文艺理论家鲁枢元说：“模糊性实质上是基于作家艺术家深刻敏捷的感觉能力，是一种理性上渐趋明确、知性上朦胧混沌的模糊，它以模糊的方式实现复杂的精神现象上的准确。”[15]因此模糊是一种智慧的体现，是显示艺术品辩证法的生命力，是最高境界的美。

需要指出的是，模糊不是指那种不合思维规律的悖论模糊，而是指符合思维规律的辩证模糊，它既不同于是非不分的糊涂，又不同于模棱两可的含混，也不同于故弄玄虚的神秘，更不同于老于世故的圆滑，它是原则性和灵活性的高度统一，充满着科学与艺术融合的灵气。

模糊本是一个牵连了哲学、美学、审美心理学的大问题，非三言两语可以说清楚。本书是以技术求证为主，只因模糊已成为一个回避不了的问题，所以做了一点初浅介绍。事实上，如果抛开模糊的哲学、美学、审美心理学含义于不顾，从某个角度来说，还可以把本问题看成是协和序进原则的继续，协和序进于内，模糊成象于外。下面重点观注模糊于作品具体的操作问题，也就是在总谱的结构（视觉）与音响的组织（听觉）上如何去模糊，看看频谱音乐作曲家已经使用了何种手段。

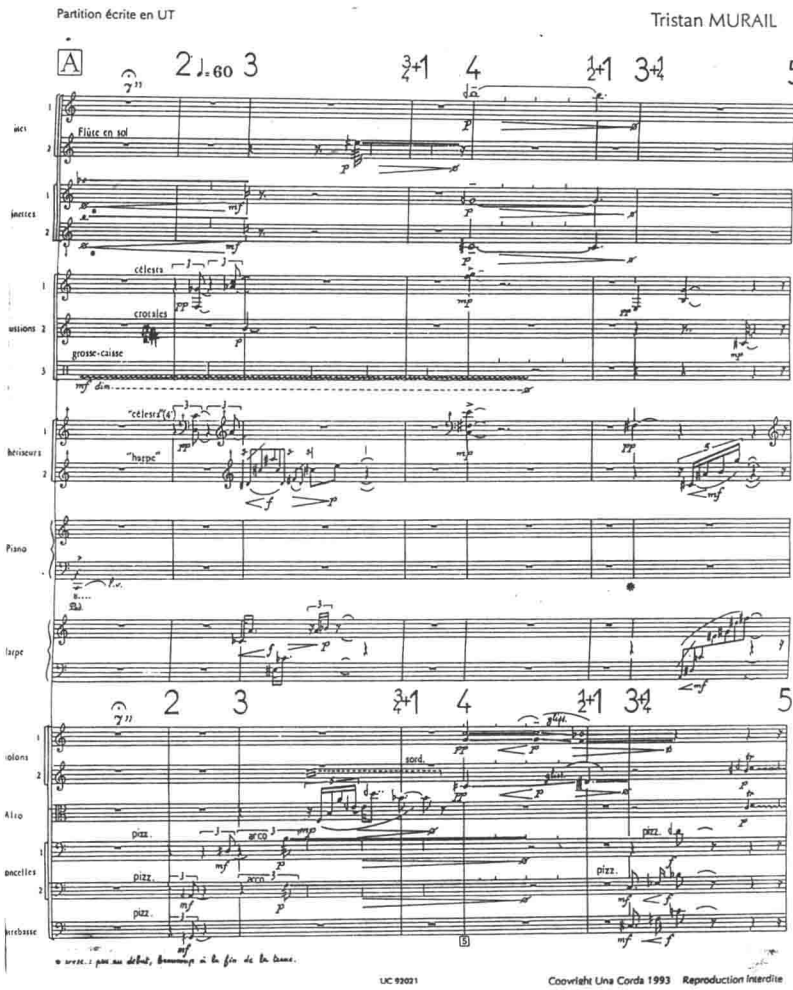
频谱音乐作曲家很忌讳使用完全清晰的旋律，即使在独奏、协奏作品中，独奏乐器也经常使用复合音、噪音等一些特殊手法，要不就是长时间的“静止律动”。到了后频谱时期，这个情况有了一点点改变，但模糊仍然是最重要的特征之一。通过前面，尤其是旋律形态一章的介绍，可见频谱音乐作品中同样使用大量的旋律，有无调的、有调的、民间的、艺术的……各式各样的旋律，但使用最多的还是已经电子化加工（扭曲、失

真、混响、延时）的旋律，这些旋律形态与传统的旋律形态在旋律存在意义方面有着大量的不同，可以说，频谱音乐的旋律仅剩旋律的形，而无旋律的意了，太清晰的旋律线出现于频谱音乐酝造的意境之中，会使人感到格格不入。那么如何才能格格相入、天衣无缝呢？手法还是模糊。

如何模糊？最常用的手法是干涉作用、旋律解构（化横为纵、合纵为横，点描手法，附加共鸣、影子和声）、麻花旋律、多维复调、节奏交错、音色混合（在同质中破坏平衡、融合原则，在异质中打破的分离、对比的界限），反其道、反逻辑进行。下面就来分别看几个例子。

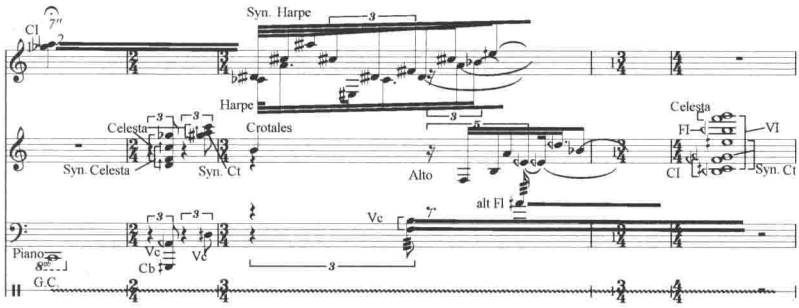
11.3.1 干涉作用造成的模糊

例 139：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 1 页



注意谱中的记谱，第二长笛此时是演奏 G 调中音长笛，第二单簧管比标准音低四分之一音，由两台合成器演奏的钢片琴、竖琴比标准音高四分之一音。为了把谱例看得更加清楚，下面把本谱例的前五小节按照绝对音高缩谱如下（移调乐器及微分音乐器都已做了实音移谱）。

例 140：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 1 页前五小节缩谱

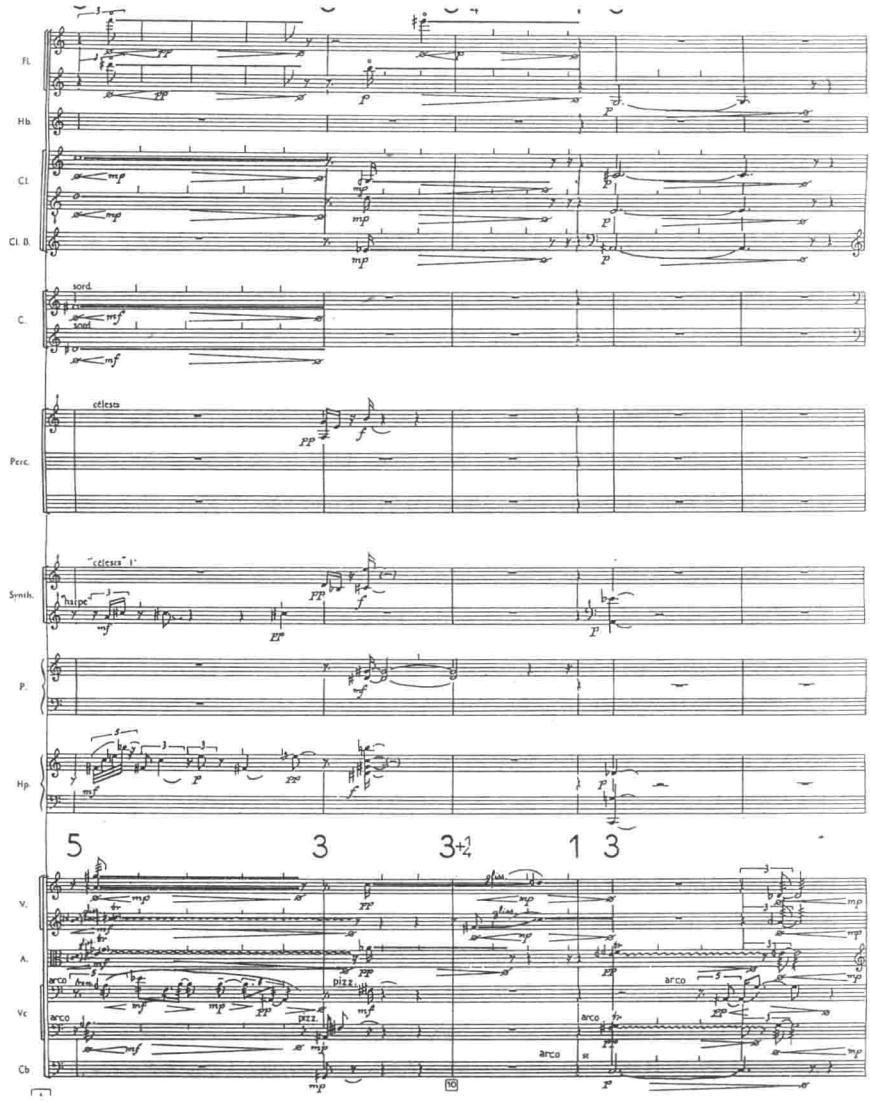


乐曲以钢琴（C_1 即基音）的起奏开始，再由大鼓滚奏与两只单簧管补偿钢琴泛音的时间过渡，形成噪音加乐音的两级背景（这本身就是模糊手法），第二小节由低音弦乐器与打击乐器构成的两次点状性质的柱式和弦进一步暗示了钢琴的谐波分音，这里运用了中空的手法，是为了制造音响的相对透明。音乐进入第三小节，这才是真正值得注意的地方，由合成器演奏的竖琴与真实竖琴及中提琴构成的带有干涉模仿性的动机型旋律第一次出现。如果按照传统的观念，会力求最高程度地保证这个旋律动机在音高、音色、节奏型、力度趋势、演奏法等方面的独立性、清晰性、唯一性。或许有人会把这三个声部看成是三个独立声部，毕竟它们在节奏、音高、旋律形态上具有独立性。但是请注意，如果作曲家要追求各自的独立，为什么要同时使用两台“音都不准”的竖琴（标准音高相差 1/4 音）来演奏螺旋纠缠性质的旋律（虽然竖琴的发音延长时间比较短，但是以谱例这种速度演奏，两条旋律线的干扰是不可避免的）。另外，中提琴回应的旋律动机在音域、音色上也同时受到两把大提琴与中音长笛的干扰，可见作曲家绝对不是追求清晰、唯一，而就是要模糊效果。这里的“三条动机旋律”是模糊的手段，事实上只有一个旋律动机——合成器演奏的竖琴具有本质意义，其余的两条旋律动机是它的相位变形，即干涉模仿。这就相当于看正弦波形，如果截位不同，完全可以看到余弦波形，要是再受外力影响，还可能使波形扭曲、变形。

所以这里的三条旋律动机可以看成一个本质，两个变形模仿，它们相互之间存在相位差，最终形成模仿干涉，目的只有一个——模糊。

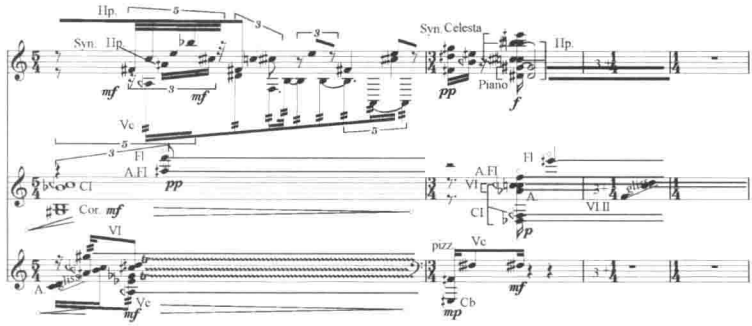
这里是作品的第 1 页，作曲家只是有保留地小试身手，所用材料还是在粉墨登场，仔细观察各小节的音，音高都具有唯一性，只有很少的重复，第五小节的和弦音构成，算上大提琴持续声部，是由八个音构成的和弦，其中仅有两个音重复，分别是 f—f^3；降$\frac{1}{4}$b—降$\frac{1}{4}$$b^2$ 都间隔了几个八度。本小节在音色分配上以弦乐为外围，夹置木管与打击乐，打击乐与木管又相互交织，加强了音色间的混合性。下面再来看看本作品第 2 页的情况，通过两页的取样分析，基本可以判断出作曲家的真实用意。

例 141：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 2 页



这一页表面看起来没有增加新的织体因素，只是把第一页起背景作用的大鼓噪音滚奏换成了乐音持续（弦乐声部的指颤音与震弓），同时强化了木管声部的背景密度，就这么一小点变化，事实上，更加搅浑整个乐音体系，使得音响画面更趋模糊。参见下面缩谱。

例 142：缪哈耶作品《瑟弘迪》总谱第 2 页缩谱前四小节



我们现在来看背景的处理，弦乐声部由中提琴、小提琴 II 颤音上滑引出弦乐组的和声大背景，小提琴 I 与大提琴以弓震音加入，这就为音响画面涂上了第一层底色。在此基础上，又以“见缝插针”的方法涂上第二层木管音色，最终形成木管组与弦乐组高密度的交织综合背景（当然，也可以把木管看成中景），注意木管与弦乐组形成密集和声排列，其中没有音高上的重复，只是木管以长音持续与弦乐组构成事实上的色差分离，在这密不透风的彩色画纸上作画，笔者想色盲是肯定看不到画的形状了！尤其是以弓震音演奏的大提琴 I 的旋律声部，它已经完全被弦乐模糊，不可能“透出成像”，即便是两个竖琴声部，也因为音域上没有优势，音色上两者中和，音高上两者矛盾，节奏上相互插空，分不清你我，最终只能是模糊成像。这里的音色布局完全背离了传统原则，在异质织体中完全混杂了音色成分，表面的同质音色顺置排列并没有使得音色层次分明，倒是由弦乐与木管形成的综合背景有一点频谱离散图的含义，而两台竖琴与独奏大提琴旋律成为了“模糊之中的清晰”。从力度趋势及分音分部的情况看本谱例可分为两次起奏，前一小节是一次，第二小节的中部以强力度（f）演奏的柱式和弦又是一次起奏，后一次的音色安排要相对简单一些，组的划分非常清楚，打击乐、木管、弦乐组都是顺置排列，但是在音高上都保证了各自的独立性，保持了高叠位的没有重复音的十五音和弦，即使是同音名，音高上也有微差，这事实上还是模糊原则。两次起奏处理也有相似性，尤其在时间过渡上都是采用衰减的方法，这不免又使我们联想起协和序进原则中讲到的书法。可见频谱音乐的织体结构到处都透出一幅频谱离散图。

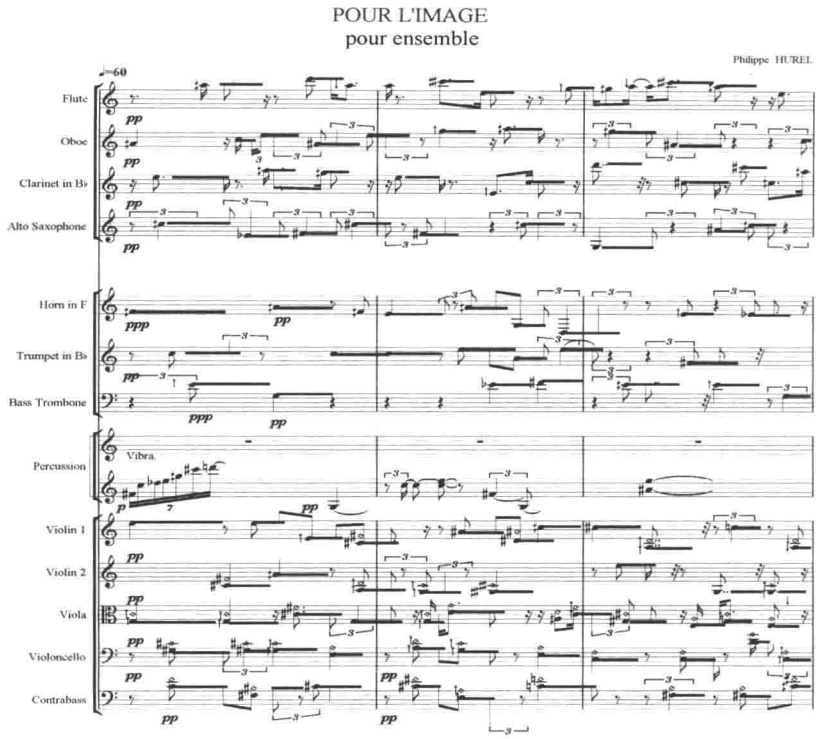
通过上面两例的说明，我们对干涉作用引起的模糊手段有了一定的了解，即起干涉作用的织体因素之间必须具有一定的相似性，如果完全不同，它们各自的独立性就增强了。从音乐效果来说，完全的相似不好（全部同一了，也就是说完全的同质织体不好模糊）；完全的不相似也不好（各自独立了，完全的异质织体也不好模糊），只有介于两者之间的织体因素（也就是，同中有异，异中有同的复合织体）才是最好的相互“干涉因素”。

干涉作用的手段主要有音高干涉、节奏干涉、音色干涉、相位干涉、力度干涉。

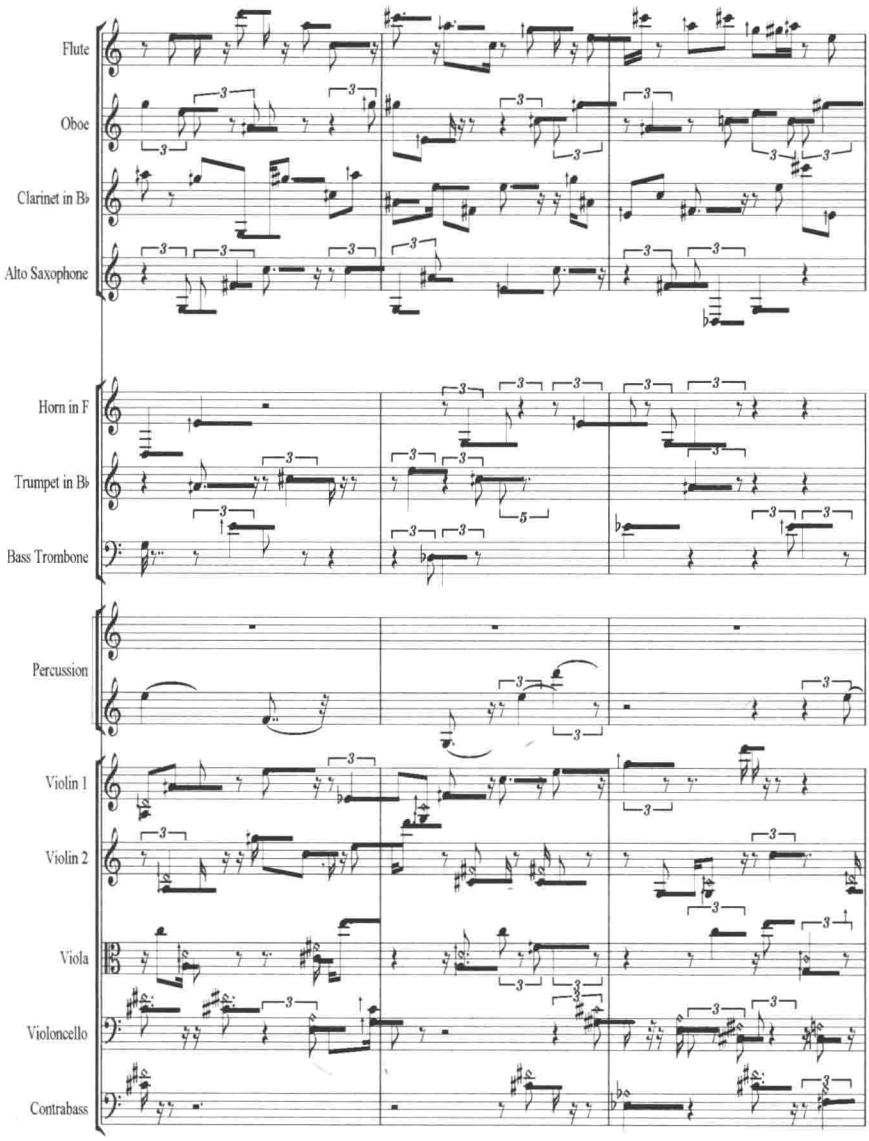
11.3.2 旋律解构造成的模糊

旋律解构，顾名思义就是把旋律肢解掉，点描法、附加共鸣、影子和声等化横为纵或是合纵为横的手法都是非常有效的旋律解构方式，以下我们来研究后频谱作曲家菲利普·宇海勒 1986－1987 年创作的一部为 14 位演奏家而作的室内乐作品《形象》（*Pour I'image*），看看他的模糊有什么“新”的手段。

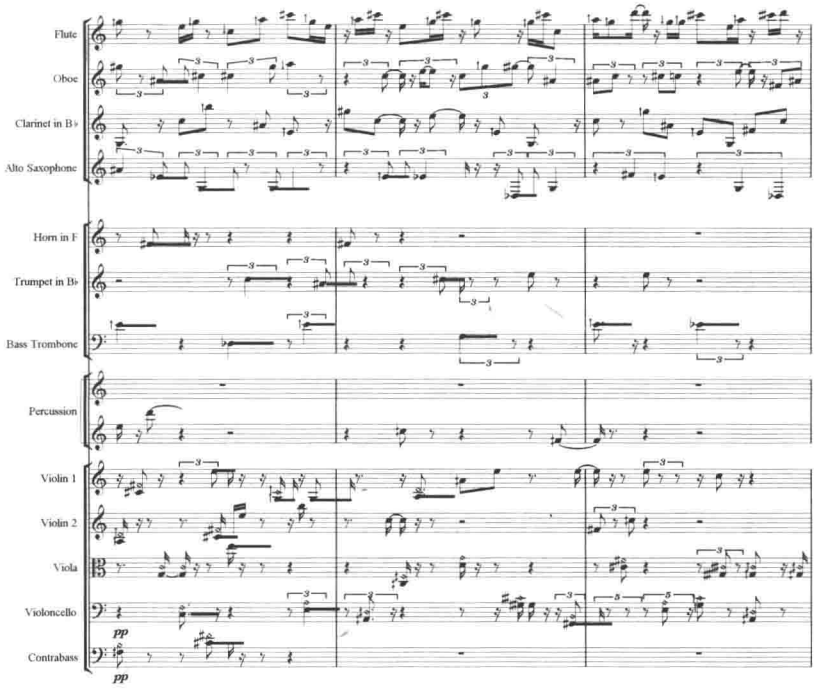
例 143：菲利普·宇海勒在作品《形象》的模糊处理，总谱第 1 页[19]



例 143 续一：总谱第 2 页



例 143 续二：总谱第 3 页

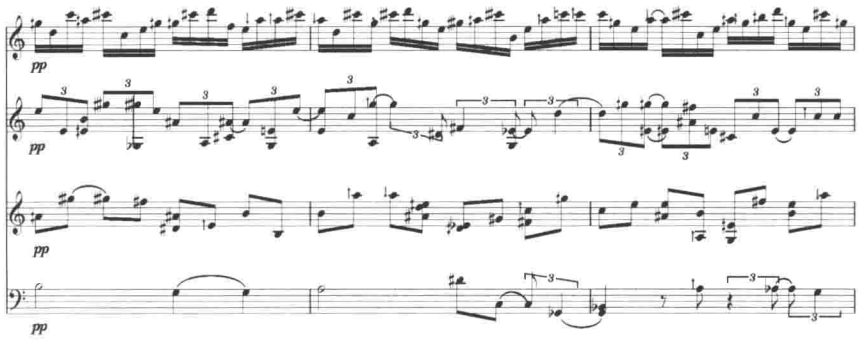


(Gerard Billaudot Editeur, Paris)

这部作品至少在视觉上是具有创新作用了，表面看起来特别“混乱”，线条非常多，又不清晰，音色高度混杂，音响混浊。是典型的“模糊思维”。那么这种写作的逻辑依据是什么呢？它的核心结构力因素又是什么？这就需要我们透过现象，挖掘本质，还原作曲家藏于谱后的真实动因。下面就以本例总谱第 1 页为蓝本，做一个取样分析。

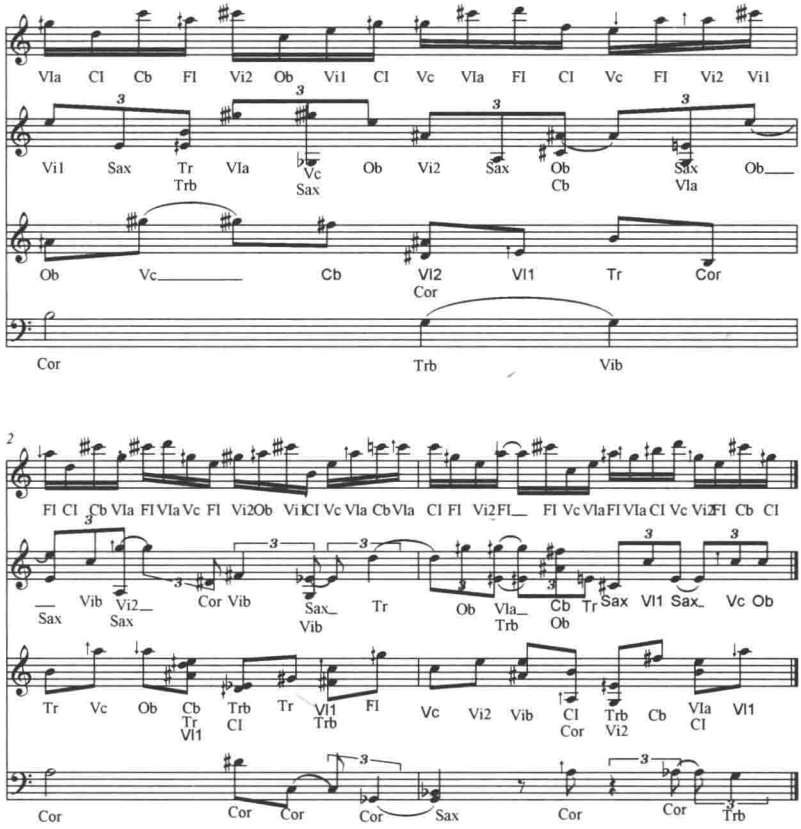
按照单位节奏值进行节奏归类，可以得到一个非常清晰的四声部对比复调织体，这是总谱的真正骨架，它埋藏于表面凌乱的总谱之中。

例 144：菲利普·宇海勒《形象》节奏归类缩谱，总谱第 1 页



为什么作曲家要把四声部复调模糊化呢？这与他在此处追求的目的有关。作曲家想创造一种渐进运动的幻觉，从一片朦胧虚景之中慢慢进入清晰的现实。因而他需要与此匹配的音响造型，作曲家通过频谱分析，根据每一件乐器的音色、谐波分布、包络、时间过渡、结构等参数信息，预先设定了一个音色序进逻辑，而后，用异质混合音色进行“点描手法”解构，把四声部的“明晰线条”化整为零，分置在不同乐器组之中。并且，借用“影子和声”、“附加共鸣”的手法进一步地模糊旋律的清晰性。为了便于我们看得更加清楚，下面把每个点结构的音色标识出来，对比分析。

例 145：菲利普·宇海勒《形象》节奏归类缩谱音色分配图　总谱第 1 页



从声部线条来看（横向分析），除了低音声部较为稳定，以铜管为主以外，其余三个声部之中，都是一个音改变一种音色：

第一声部：十六分音节奏，在弦乐与木管乐器中频繁交替音色。

第二声部：八分三连音节奏，在弦乐、木管、铜管、打击乐组频繁交替。

第三声部：八分音节奏：在弦乐、木管、铜管、打击乐组频繁交替。

第四声部：综合节奏：铜管音色为主、出现一次打击乐（Vib）、一次木管（Sax）。

由“点描法”组成的混合音色旋律线一目了然，各声部旋律线条成为了斑点跳跃的音色旋律，由于这些旋律线在不同的乐器组里陡然巨变，它使传统的音响平衡、融合及音色分离、亲和等原则“丧失殆尽”，形成凹凸不平、轻重无序的混杂音响，这里的技术处理确实让人看着心跳。可谓艺高人胆大！

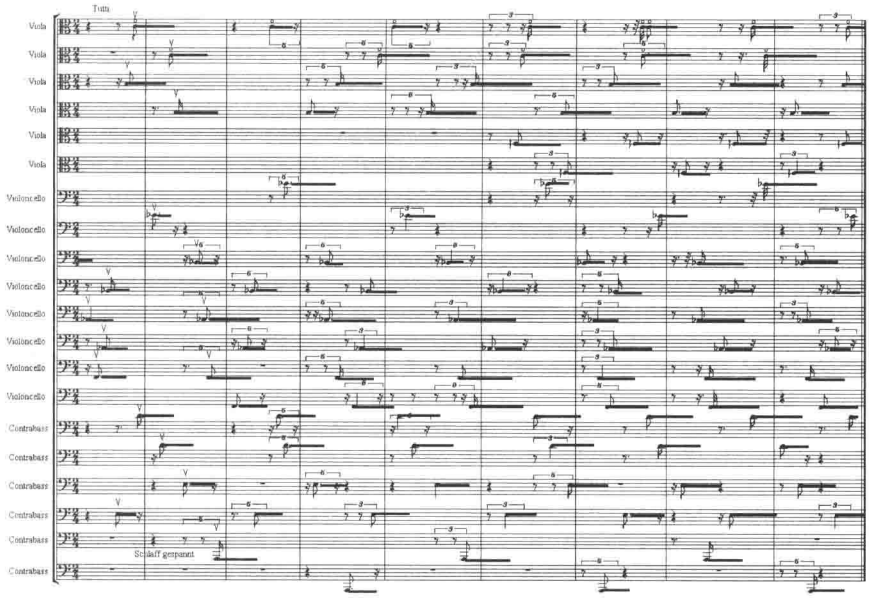
从纵向分析：

以最小节奏值十六分音符为单位提取纵向拓片（可以目测进行取样），可见每一个拓片的音响组成结构都有变化，整体音响呈现了一种色彩斑斓、变幻莫测的混浊点状图，这个模糊而不糊涂的点状画，隐隐约约渗透出一种有形结构（四声部复调）。这正是作曲家需要的音响造型，为了这种朦胧的模糊取得一定的融合性，作曲家要求每件乐器都以（ppp 或 pp）很弱的力度演奏，弦乐组以泛音演奏法为主，同质乐器音色被分配在不同的点上接应替代发展，各音色在其中重叠、吸收、化合，演奏重重迭生的旋律结构。后面两页总谱，通过逐渐减少铜管、打击乐、弦乐组的声部数量，稀释、淡化它们的浓度，从而使隐形的旋律线条逐渐聚焦于木管声部，作品音响从起初的 14 人乐队全奏（总谱第 1 页），逐渐简化到木管四声部复调（总谱第 5 页）（参见本书第八章 8.3《由循环构成的复调》例 98）。

从总谱第 1—5 页音响布局是一个递减的过程，由模糊至清晰，由异质混合音色到同组对比音色（各声部一件乐器），由难以理解的音色不协和结构过渡到可理解的音色协和结构。区区五页，十五小节的音乐却带我们穿越了时空隧道，从当下此际逆向回溯到了古典时期，超越三个世纪。

这种织体结构并不是菲利普的首创，早在 1974 年，格瑞瑟在作品《起源》中就已经使用了这一频谱音乐标志性的织体结构。

例 146：格瑞瑟《起源》总谱第 8 页弦乐组部分



这里同样是使用“点描法”来解构旋律线，同时伴有“附加共鸣”、“影子和声”，不同的是这里使用同质音色来分离旋律线条（全部在弦乐组分声部进行），而上例菲利普却使用异质混合音色来分离旋律，使其不协和程度更加强烈，色彩对比达到令人咋舌的地步。从勋伯格的“音色旋律”到威伯恩的“点描手法”；从梅西安的“附加共鸣”、鲁托斯拉夫斯基的“影子和声”到格瑞瑟的“同质综合运用”再到菲利普的“异质混合音色运用”，每位作曲家汲取前人精髓，并创造性地向前迈了一小步，音乐历史就此写成。这也再次证明申克所言“永远一样，惟方式不同”、“创新不等于惟新”[17]之先知灼见。

11.3.3 节奏分离、发音点错位造成的模糊

前面已经说过频谱音乐的节奏处理相对于音高、音色因素而言，要保守一些。这样做的目的正是为了保证有限的“清晰”。如果要是节奏因素达到了高度的数学精密，使得每一个发音点都独立且错位，音响的画面就会变成为了模糊而模糊的“糊涂”，同时也会给演奏家及指挥家增添不必要的麻烦，所以这种完全精密的“概率节奏”不是很可取，因而频谱音乐作曲家没有采用这种完全打破“心理律动标准的概率节奏”。但同时我们又要看到有限的节奏错位、分离、重叠、吸收又不失为一种很好的模糊手段，它能够回避小节固有的简单节奏律动规律，使得发音点“错而不乱”，

整个音响结构还处于一种可控制的范围以内，指挥家、演奏家也不会增加多余的心理负担。这种模糊方式使用得最多的就是数列组合节奏，也就是按照一定的数列关系递增（递减）单位拍的发音点数，使得不同的声部按照不同的数列规律序进，最终求得音响的有限模糊。

格瑞瑟在管弦乐作品《起源》总谱第 26 页处就使用了这种方法。谱例参见第八章《频谱音乐的复调特征》之 8.6《速率复调》的例 102。下面我们把本谱例各声部，按照每一小节为一个单位，统计分析各声部的发音点数，以便使其节奏组织一目了然。

例 147：格瑞瑟《起源》各声部节奏发音点数统计图，总谱第 26 页

乐器名	各声部每下节发音点数						
FI	19	21	23	25	23	21	19
CI	21	23	25	30	25	23	21
CI. B.	13	15	17	19	17	15	13
Sax.			9	11	9	7	5
Fg.		11	13	15	13	11	9
Cor.				7	5	3	
Acc.	17	19	21	23	21	19	17
Vn. 1	15	17	19	21	19	17	15
Vn. 2	11	13	15	17	15	13	11
VIa		9	11	13	11	9	7
Vc			7	9	7	5	3

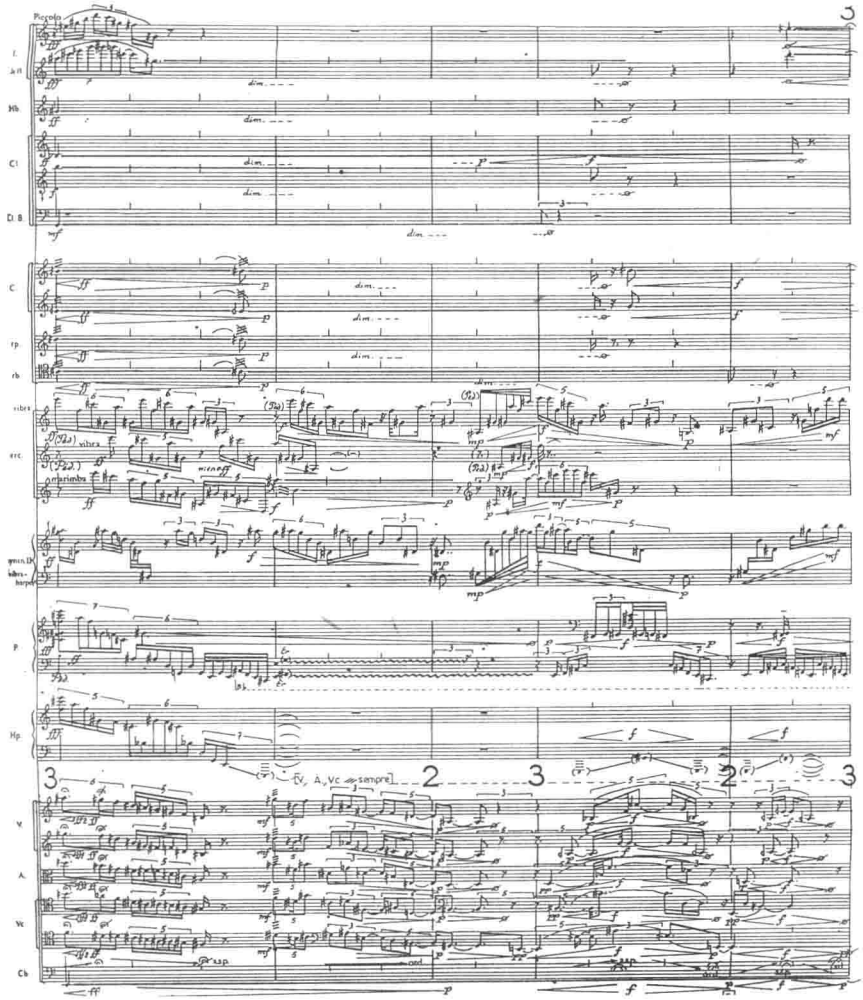
由表中可见，每小节的发音点数由 3、5、7、9、11、13、15、17、19、21、23、25、(30) 按照奇数数列构成（只有单簧管一个声部出现了一次 30 个发音点数的情况，这次偶数可以忽略不记）。而且声部的纵向组织都保持了各自声部发音点的独立性，即没有一个声部在相同小节出现一样的节奏律动，各声部横向异步递增到达本页的第四小节同时达到密度最大值，而后以递减的方式又各自异步逐渐淡化，整个过程都保持了模糊属性。像这样以数列节奏达到模糊效应的手法，许多作曲家都喜欢使用。主要是以自然数列、奇数数列、偶数数列、等差数列、等比数列、质数及菲波拉奇等特殊数列的形式使用最多，不管使用哪种数列形式，由于它们都以某种节奏时值作为“单位拍”（也就是说，单位拍还存在），因而最终达到的模糊效应是一种有限模糊。因为这种手法已经相对普及，使用的作曲家也相当多，谱例俯拾皆是，在这里就不再一一介绍了。

11.3.4 麻花旋律、多维复调造成的模糊

螺旋缠绕、麻花旋律及多维复调在前面也已经多次介绍，要注意的是这些手法很少单独使用，而是常常伴随着别的手法一起使用，尤其是与音

色混合连在一起。音色混合多是被作为别的手段造成的结果，实际上，音色混合既是目的，也是一种手段。若想求得音响模糊，音色当然需要混合，至少也要复合。混合是难分你我，共成一体；复合是可分你我，并存一体。从音色的角度来看，从单质—同质—异质音色，模糊的效果会越来越好；从织体的角度来看，从同质—异质—复合织体，模糊的效果也会越来越好；从音高上来看，准与不准，倍频与旁频、间谐波，同时并用模糊最有效果；从波形包络来看原型与变形、失真如影相随、难分伯仲模糊最有效果；从频谱来看，尽可能多地去发现、探秘声音的更多秘密，揭示出尽可能仔细的参数信息，模糊的手段会越来越多、越来越好。下面就再回过头来看看缪哈耶在《瑟弘迪》的处理手法。

例 148：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 9 页



这页总谱的前两个半小节的织体组成在第八章《频谱音乐的复调特征》之8.7《多维复调》的例104里详细地介绍过（总谱12页再次出现这个织体，而且更加完善），本页是这种织体在作品中的第一次出现，这个织体有五种不同的结构因素分别是：

a. 一对平行旋律：picclo＋fl.　木管高音（前景II）

b. 长音持续背景：Ob＋Cl. I＋CI. II＋Cl. B.　木管组

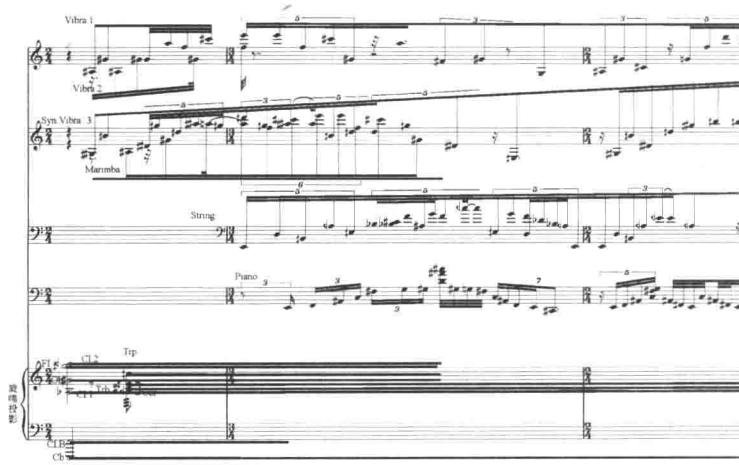
c. 长音颤奏背景：Horn＋Trp. ＋Trb.　铜管组

d. 螺旋麻花式旋律：Perc . I＋SynthII＋Piano＋Harpe　整个打击乐组加合成器与钢琴竖琴构成主要前景I

e. 带状中景旋律：Vl. I＋VI. II＋Vla＋Vc＋Cb　整个弦乐组构成中景带状旋律

它们形成异质织体模糊结构，详细分析参见第八章8.7《多维复调》相关内容。在此，我们把注意力转到本页总谱的后一半（两个半小节）上来，仔细研究一下这里的模糊手法。

例149：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第9页3—5小节实音缩谱



先看背景声部，这几小节还是在持续本页第一小节出现的木管与铜管组的复合音色，两种演奏法（长音与颤音）全域覆盖打上底色。在此底色基础之上先后出现了六条线性化旋律，其中的一条是由弦乐组合并综合节奏投影而成，即这条旋律是采用节奏综合、聚集散落在各个弦乐声部之中的分离旋律而形成的合纵旋律。而各声部同时又采用“附加共鸣”、“影子和声”的方式来延伸各自声部的持续，使其最终既形成第三种组合音色背景，又嵌入一条模糊旋律线，这条旋律线与四条打击乐组成的旋律线及钢琴低音区出现的旋律线形成“干涉模仿”，手法综合了前面已经介绍过的

音色、相位、音高、力度、节奏干涉各个方面。线条之间的干涉作用已经非常明显，再加上六条旋律的所属音区，已经被木管、铜管组全域先入为主地侵入，所以，整个音响画面的模糊性是不言而喻的。

这一页谱例完整地看，正好综合运用了前面介绍的所有手法，干涉作用（音高—音色—相位—节奏—力度）、旋律解构（点描—附加共鸣—影子和声—化横为纵—合纵为横）、麻花旋律、多维复调、节奏交错、音色混合等手法，其逻辑与反逻辑思维运用自如、相得益彰、天衣无缝，本身就是一个很好的具有总结、代表性的谱例，值得我们去记忆、学习。

注释：

① 参见《第二届中国现代音乐创作研究年会论文集》，武汉音乐学院 2007 年 10 月版，第 106—122 页。

② 杨立青：《管弦乐配器法教程》，上海音乐学院作曲系教程，1991 年 12 月版，第一卷（文字部分）。

③ 参见武汉音乐学院学报《黄钟》2008 年第 1 期。

④ 为中提琴独奏而作（1976），Paris：Editions Transatlantiques.

⑤ 《寓言》（*Allegories*，1989/1990）。17′，为六位演奏家和电子声音而作［长笛（兼短笛）、单簧管、圆号、小提琴、大提琴、打击乐、电声：苹果电脑、MIDI 键盘、雅马哈合成器］TX816，法国政府委约，Paris：Editions Lemoine.

⑥ Tristan Murail：Villeneuve-les-Avignon Conferences，Centre Acanthes，9－11 and 13 July 1992 Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，pp. 187－267.

⑦ *Verbleiiiiungen*（Editions Wilhelm Hansen）编辑：威廉·汉森为两只长笛、双簧管、单簧管、中音萨克斯、大管、四只圆号、小号、长号、大号、竖琴、钢琴、八把小提琴、五把中提琴、三把大提琴、两把低音贝司和磁带而作。

⑧⑨⑩ Damien Pousset：*The Works of Kaija Saariaho*，*Philippe Hurel and Marc-Andre Dalbavie—Stile Concertato*，*Stile Concitato*，*Stile Rappresentativo*，Contemporary Music Review2000，Vol. 19，Pan 3，p. fv—l 10.

⑪ 《烟》（*a la fumee*），1990 年为中音长笛、大提琴和管弦乐队而作。

⑫⑬ 图形取自米勒·帕克特《电子音乐的技术与理论》，第 207、206 页。Miller Puckette，*Theory and Techniques of Electronic Music*，University of California，San Diego DRAFT Copyright @ 2003 Miller Puckette April 1，2005.

⑭ 王明君：《模糊美学》，中国文联出版社 1998 年版，第 92 页。

⑮ 藤英超编著：《中学语文教坛风格流派录》，辽宁教育出版社 1994 年版，第 217 页。

⑯ 《形象》（*Pour l'image*，1986—1987）为长笛、双簧管、单簧管、中音萨克斯、圆号、小号、低音长号、两个打击乐、两个小提琴、中提琴、大提琴、低音贝司十四件乐器而作。

⑰ 申克：《自由作曲》，陈世宾译，人民音乐出版社 1997 年版，第 12 页。

下篇　原理运用与实践

实践是检验真理的唯一标准，好的理论不应该受地域性、风格性、时域性限制，它应该能广泛运用于社会实践，它无须担心人们的错觉和不理解，终将会因其自身所具有的时代性、先进性、前沿性而走进社会，服务人民！本章选取法国频谱音乐以外的六部作品以及一篇讲座导读为例，检验这一理论成果对于不同风格、不同国籍，尤其是对于中国作曲家的创作实践的指导意义，探索它对创作前的案头准备、创作后的音乐形态等领域运用的科学性、艺术性、适度性。

第十二章　对利盖蒂为弦乐队而作《分歧》的频谱分析

该作品由作曲家在1968年至1969年创作，属于作曲家到西欧以后的重要作品，乐曲采用两组室内弦乐队相辅助、对抗的模式进行，乐队编制很有意思，作曲家把弦乐队分成音高相差略大于四分之一音的两组，每组由六个单件乐器（同质音色）构成的六声部。第一弦乐组：标准定音 a1＝453Hz，由四把小提琴、一把中提琴、一把大提琴组成；第二弦乐组：标准定音 a1＝440Hz，由三把小提琴、一把中提琴、一把大提琴、一把大贝司组成。作曲家特别强调："小节线仅仅起到各独立声部同步的作用，它们没有衡量节奏尺度的功能，因此，在开始和每一个小节线的内部都不应该有重音。相反，演奏应该是流畅的。只有在乐曲处标明才能奏重音，在小节内它们的位置是独立的。"

在20世纪个性化风靡的写作时期里，在十二音序列都已成为"古典"的世纪后半叶，作曲家本着对生活的异化反映，去超越前人、超越自己，把众多业已成型的规律、原则都砸烂［如上面作曲家对"小节线"的解禁。事实上被冲破的领域远远不止这点，调性、功能、主音被砸烂；平行带状进行，使"自然音程"的平行都成为有理；取消声部的交错、超越、对斜的界定；取消小节线、拍号的束缚；动机分裂的遗弃、主题散点的投影（点描法），甚至不要主题；追求寂静而非律动；对音程的认识和运用精细到微分

音，进而微复调、宏复调；音色旋律与白昼效应；放弃乐音解放噪音等]。现在很容易在作品中找出已经变异的“原则”、“规律”、“元素”、“事件”。20世纪的新音乐创作正“为创新而疯狂的奋斗”[①]。

以下就本作品的技术处理手法作细部分析。根据作品的音响组织结构，在分析中除使用常用的技术手段外，特引进电子声学中的频谱仪，对于作品的实际音响，作出科学的、客观的分析，以便我们能更加深入地认识作品组织的结构奥秘。为便于分析，先将有关声学原理、频谱知识和常用术语做一个简要说明。

1. 对泛音的再认识：

在传统和声及律学理论中，强调运用的是基音及其前16号泛音，它是传统和声和弦结构的理论基础（各种三和弦、七和弦……），它对“音”的微观认识只达到小二度的境界，小于小二度的微分音，尽管它早已存在，却无法解释。但对微分音的开掘、利用早已是众所周知的事实。人们不仅要问：微分音的组织依据是什么呢？过去常说，它是以乐音的形式追求噪音的效果。再追问一句，为什么呢？就很难说清楚了，现在借助声学中的频谱分析，可能有助于解释这种现象。

2. 微分音标记：

以下把音程的最小量化值精确到八分之一音，标记如下：

升种类（依次升高八分之一）

♮ ♮ ♯ ♯ ♯ ♯ ♯ ♮ ♮

降种类（依次降低八分之一音）

♮ ♮ ♭ ♭ ♭ ♭ ♭ ♮ ♮

3. 倍频：由基音的整数倍谐波组成，在频谱图中表现为亮光频谱波形，它包括基音及其产生的共振峰谐音，多为16号泛音以内的谐音，尤为11号以前的谐音为多，11号以后的谐音人耳很难辨析，只有通过仪器才能发现。

4. 旁频：由基音的非整数倍谐波组成，在频谱图中表现为暗光频谱波形（阴影），它多为基音的非共振峰谐音，尤其高频谐音为多，通常以16号以后的谐音表现。[②]

参见例150[③]。

横轴代表时间，单位——毫秒（ms）；

纵轴代表谐音波（基音的泛音）谐音号、频率，单位——千赫兹（KHz）。

例 150：时间·频率二维频谱图

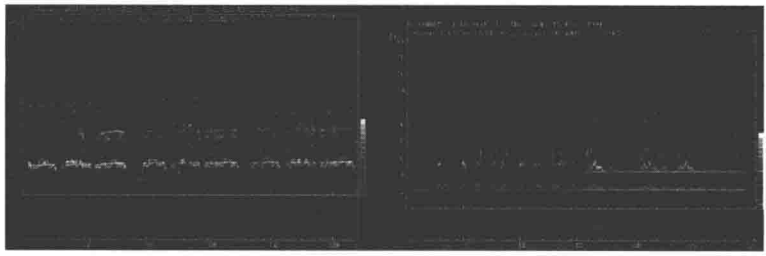


图 1A

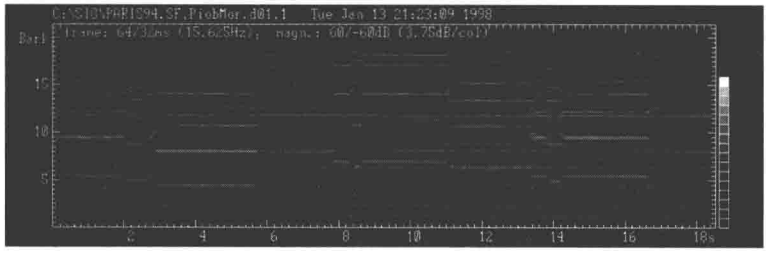


图 1B

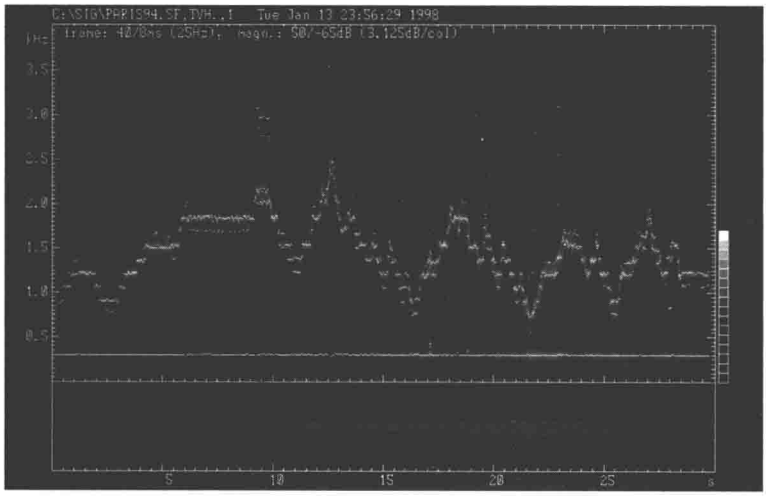


图 1C 为局部放大图

可见每一个波段都不是单一的波，也就是说，每一个音高的音（作为基因的音）都有其丰富的谐音。较为清晰的光谱为基音及其共振峰的谐音（因乐器性能而变，有些质地的乐器在整数倍上，有的在非整数倍上）（如律学中的 1—16 号泛音），光谱中还有一些不清晰的暗线（阴影）的存在，由图 1A 在 16—25 毫秒的区域内，可以清楚地看见，越到高频段，谐音越

密，它表明谐音间的音程距离，随着谐音数的增加而加密（音程缩小），正好形象地反映了泛音规律。

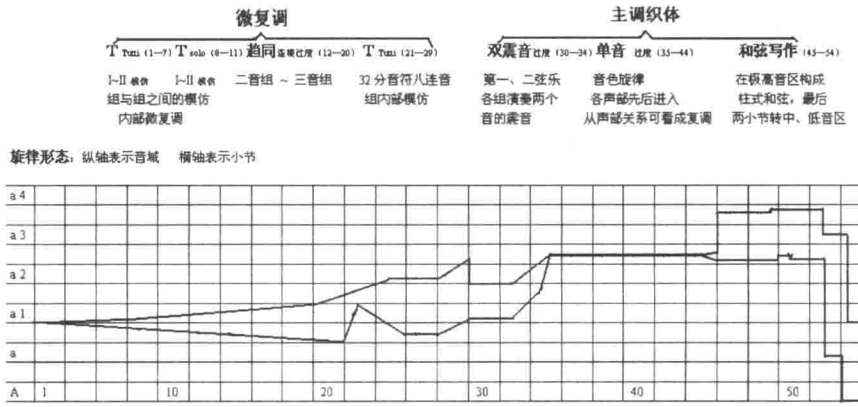
通过图 1B 可以看到，越到高频段，暗线越多（音程的密度越高，不协和性越强），每一个清晰的整数倍频段，都覆盖有自身的暗线（阴影）。

通过图 1C 可以更清楚地看到，主要光谱的周围罩了（裹了）一层阴影光谱，这就是旁频和间隙波。

在 20 世纪以前的音乐作品的组织结构中，主要在强调基音及其产生的倍频泛音上[④]，甚至把谐波泛音按照人为的律制（如十二平均律、二十四律等）划分，导致理论与实践有相当大的出入。对于音响、音色的本质认识也存在一定的距离。随着科学技术的发展，尤其是电子声学技术的发展，使得人们逐渐深入地认识了声音、音色的本质，把我们过去看不见、摸不着的声音，通过电子仪器、频谱图表把它们“还原”成看得见的“客观实体”，这对于我们认识声音的本原，无疑起到了不可替代的重要作用。随着调性的瓦解，不协和性的深入挖掘，越来越多的作曲家开始运用非整数、微音程、高密度的不协和音，事实上就是在挖掘使用上列光谱图形的阴影，利盖蒂的这个作品就是一个实例。两个弦乐队的音高、音响正好是第二组（II Group）演奏倍频光谱部分，第一组（I Group）作为主频光谱的阴影裹附在主频周围，演奏旁频、间隙波部分。整个作品可以分为两个部分，见例 151、例 152。

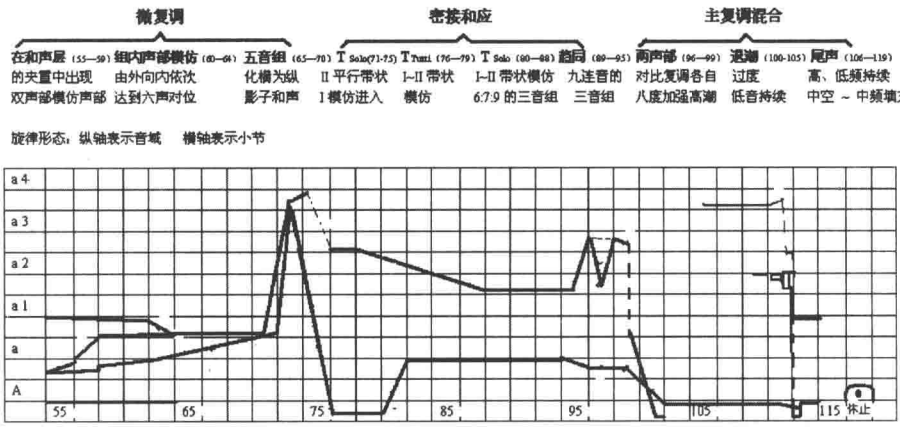
例 151：利盖蒂《分歧》（*Ramifications*）曲式布局

第一部分（第 1—54 小节）



例 152：利盖蒂《分歧》曲式布局（续）

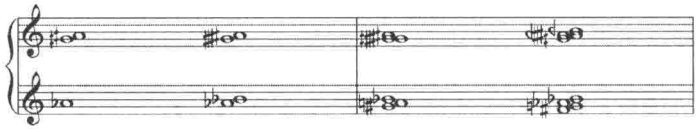
第二部分（第 55—119 小节）



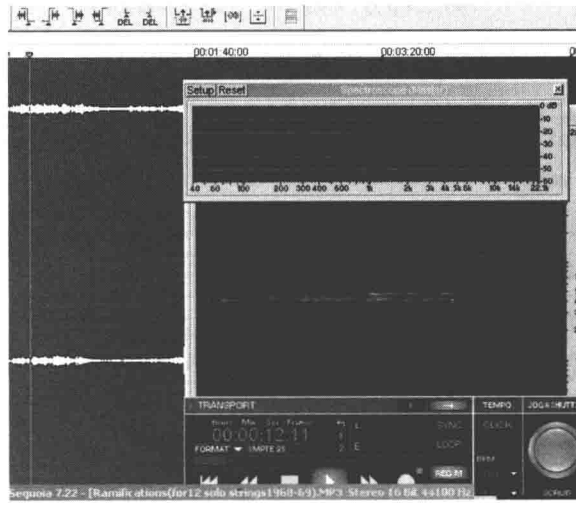
图中纵坐标为音域宽度，横坐标为小节数

通过两图对比可见，第一部分乐曲 94.5%是在中、高，甚至极高音区演奏。乐曲一进入就好似一道光谱由降 a^1 音发出，在降 a^1 的下方（比它低）四分之一音处，由第一弦乐组发出比谱面音高高四分之一的 g^1；在降 a^1 的上方（比它高）四分之三处，由第一弦乐组发出比谱面音高高四分之一的 a^1。它们两音依附于降 a^1 而存在，就好似另外两条波长不同，折射率不同的光谱，随着降 a^1 向前，合成射出一条扇形光谱（1—20 小节）。参见例 153（乐谱 1 — 2 小节的缩谱），可见事实确实如此，随着音乐的进行，一条音束[5]密度越来越强，同时向两个方向（一上、一下）发展。例 154 为这两个小节的实际音响的光谱，进一步证明了事实的存在。在此，运用德国软件 Sequoia 7.20 做取样分析，由于频谱仪一次性的可取时间非常有限，时间精确到毫秒，因而只能进行局部取样分析。

例 153：利盖蒂《分歧》第 1—2 小节缩谱



例 154：利盖蒂《分歧》1—3 小节频谱呈现



可见主频就在 400Hz—490Hz（频谱亮光）处，逐渐拉宽，在 800Hz—900Hz 处有清晰的谐音（断断续续的暗光），1—3KHz 处有隐隐约约的谐音（点状线）。从谱例、旋律形态分析图及频谱分析图中都能看见：作曲家长时间没有使用中、低音区的音，在 20 小节处使用的 d1 音，已经是第一部分前 94.5%的最低音了，由此可以证明作曲家已经废除了“泛音原理”——不需要低音的支持，不需要上密、下疏、中不空的音域布局。而是采用在非常窄的音域内，用高密度地纠缠在一起的音束来陈述作品。可见作曲家的异化性、否定性、超越性是走得何其的彻底！乐曲开始处的微分复调是采用：组内音高统一、节奏分离、数列控制（发音点数）、延时模仿的方式进行的，由于时间的错位，使其横向的“旋律”成为“化横为纵”的“影子和声”，在微观处化合、飘忽、游离，同时又缜密，使其宏观处坚实地向外蔓延、扩展。参见下列发音数数列组合：

例 155：利盖蒂《分歧》（第 1—8 小节）节奏发音点布局

图中的数字表示各声部分句的发音点数。

乐曲一开始就采用这种自然数列（模仿声部发音点数依次减少），横向再依次减少或增加的方式。又由于各声部的分句和起始时间不同，使其节奏时值保持分离，并逐渐拉长，最终使得每一个弦乐组构成一种“混响延时”的效果。这就是利盖蒂个性化的标志“微复调技术”，它事实上是文艺复兴时期产生的“有量卡农复调”[6]的技术变形。作曲家在此的目的是追求“分离性”，这种分离的特性，在主题的第二次进入（第八小节处）得到了继承和发扬，紧接着就进入了“趋同”性的两音组、三音组阶段，音束的带状频幅也逐渐加宽，到二十小节音域已超过一个八度。参见例 156。

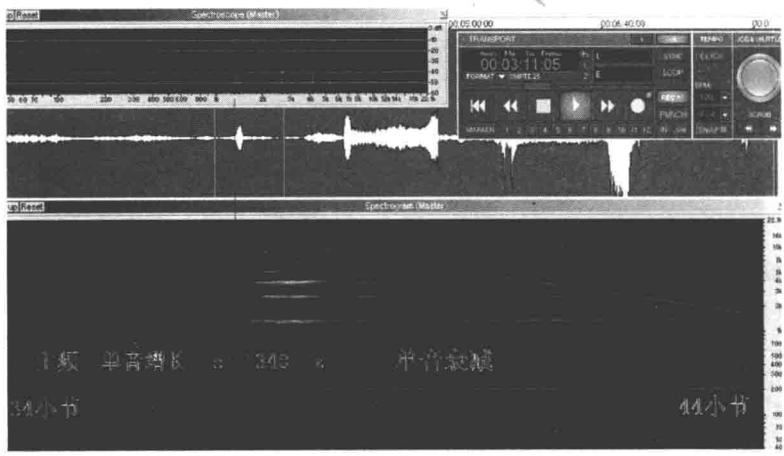
例 156：利盖蒂《分歧》第 20—30 小节频谱变化图

随着音域的增加，各声部只演奏三音组的和弦分解，因而音束的密度减弱，从上图可以看到频谱仪的光谱比较散，没有例 154 的光谱缜密。到了 21 小节进入了组内主题的模仿阶段（三十二分音符的完整八连音），并急速向中、高音区发展。从整体的织体特征考虑，这阶段的微复调手法具有“ABA 再现性原则”。由此可见，无论作曲家怎么革命彻底，如上方的例 151、例 152 作品曲式布局及例 154 缩谱形态，从外围看，它已经变革得很彻底了，很难简单地说，它体现了某种原则。但是通过细部分析，还是能找到它的潜结构。这从另一个方面证明了传统影响的深远和巨大，创新不等于惟新！就好比我们在地球上妄想要摆脱地球的引力一样，它是不可能的！同时也证明对于音乐作品的创作来说，曲式结构虽然不定型，即通常所说的“曲无定式”。但这仅仅是表象而已，就其深层的一般原理是很难突破的！比如并列、衍生、对比、再现（重复）、复合、循环、变奏、平衡这些原则；犹豫、阻断、转折、分裂、交叉、多相嵌入、重叠，等等，这些经典布局手法，哪个时期、哪个流派不在使用呢？

频谱分析可以实时监控作品的每一个音响细节，这对于音乐分析及作曲家案头音响精密研究具有至关重要的作用。由于本书篇幅所限，以下再就本作品的几个重要特征点做出取样分析，以期检验例 151、例 152 的曲式分布是否与频谱呈现相一致。

在例 151 中可以看出 34—44 小节完全是在单音延长，总谱求证也是这样。但是作曲家在这十个小节中追求什么目的呢？这很难从曲式分布图中看出来。而频谱图却能把它显现无遗。参见例 157。

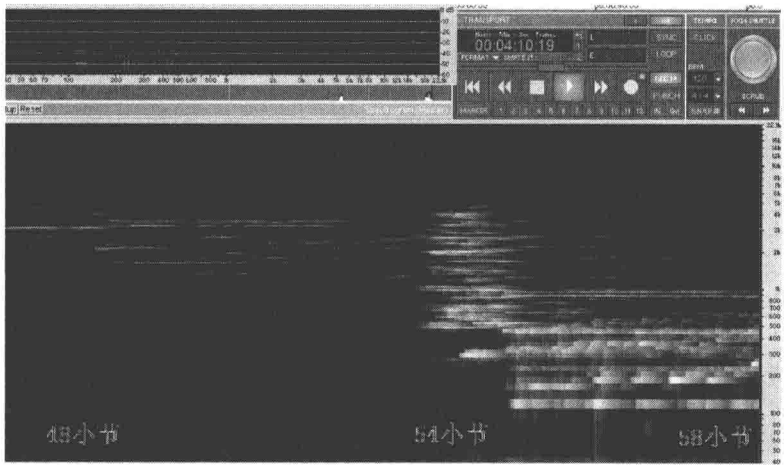
例 157：利盖蒂《分歧》第 34—44 小节频谱变化图



可见作曲家实际上在这里完成了一次“单音增长至单音衰减”的全过程，主频音高在 1340Hz（小字三组 e）上持续，在密度最高点处出现了许多谐波泛音（见图亮光部分）。这里的写作技术正是运用了同质音色密度递增至密度递减来达到的，这是音响化作曲非常重要的一种基本技术，体现了协和序进原则。同时由于基音的谐波分布的改变，造成了事实上的音色改变，这是音色旋律的微调变化。

紧接着乐曲以微分音偏移的方式逐渐离开基音，向它的谐波泛音发展，54 小节急转直下冲入低音区，这是整个作品第一次使用低音音区，这种长时间回避低音区的手法在传统作曲中是非常罕见的！而后乐曲再慢慢地向中声区发展，参见例 158。

例 158：利盖蒂《分歧》第 48—58 小节频谱变化图

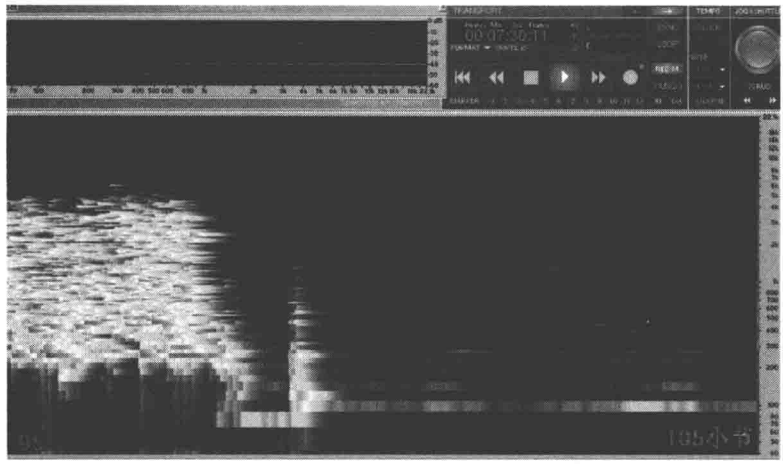


乐曲进入 71 小节开始急遽上升到 74 小节达到顶点，而后倾泻而至拉出整个作品最宽的旋幅带宽 75—79 小节，参见下例的频谱显现。

例 159：利盖蒂《分歧》第 71—79 小节频谱变化图

仔细对照上面两图（例 158、例 159）从透光镜的谐波分布及频谱显示可以看到 79 小节处的频谱带宽呈现最宽，而且密度远远超过了 58 小节，倍频、旁频、间隙波也最丰富，表明这里是整个作品的波峰。而后作品缓缓反向收缩至十二度旋幅带宽以内，延续到 96 小节进入全曲最明晰的旋律陈述，以 fff 强力度全奏倾泻而下形成强势退潮。参见例 160。

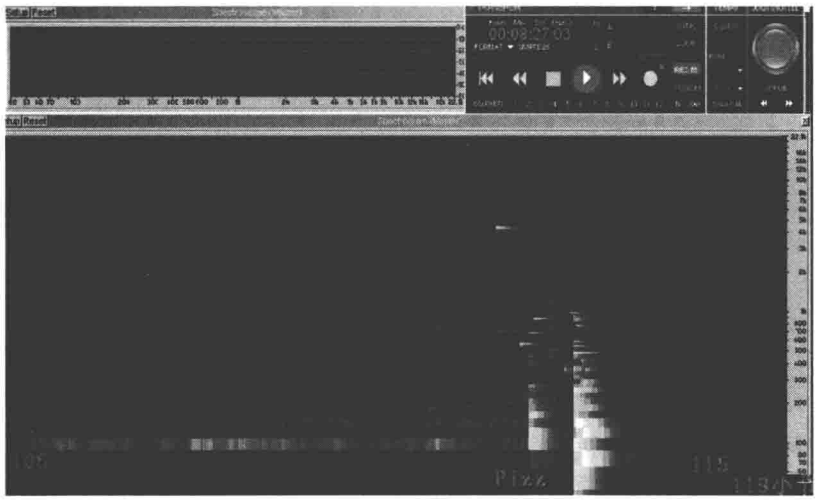
例 160：利盖蒂《分歧》第 95—105 小节频谱变化图



从图中可以看到第 95 小节开始的对比复调织体退潮力度很强，频谱的橙红色倍频光谱最为清晰，绿色的旁频及蓝色的间隙波也同样清晰可见。这是全曲最富色彩动感的地方。

106—119 小节为全曲的尾声 Coda，频谱呈现如下。

例 161：利盖蒂《分歧》第 106—119 小节频谱变化图



可见图中除了一个持续的基频音以外（45Hz 处），而后就是它所产生的泛音如影相随，有趣的是中间空了一大块频率范围，而在两千赫兹以上出现了明晰的倍频音，这是作曲家有意使用小提琴泛音奏法，出现的高频音，它们的泛音继续向上翻倍。这里的中空处理正是为了后面出现的弦乐拨奏预留空间。可见作曲家的音响、音色布局之老到！

以上我们用“视在的音乐语言”分析了一部重要的现代音乐作品，可

以看出这种方法有助于我们认识音乐的本源，声音音响的本质。充分利用现代科技的认识成果，拓展研究声音本质的途径，揭秘万世不竭的声音秘密。这种分析方法无疑对我们传统的音乐分析技术提供了一种补充，这也是本文写作的真正目的。作曲的过程在某种意义上成为了运用音色过渡与音色持续、节奏异步与节奏同步、浓度加密与淡化稀释、清晰与模糊、静与动、高与低、阴与阳的辩证过程。频谱把许多我们曾经看不见、摸不着的音乐组织参数具象化了，这是频谱的意义！

注释：

① 萨尔策（Felix Salzer，1904—1986）：Structural Hearing，New York，1952，2/1962.

② 需要说明的是，旁频音区的音一旦被作为基音被乐器强调的话，它就变成了倍频，成为亮光频谱而非阴影。

③ 图形源自 Visualization of Multi—Part Music（Acoustics and Perception）Werner A. Deutsch（Austrian Academy of Sciences，Acoustics Research Laboratory）and Franz Födermayr（Institute of Musicology，University of Vienna）。

④ 基音及其前 16 号泛音成为传统和声、复调纵横组织的基础；协和与不协和判定的理论依据；上密、下疏、中不空配器、织体组织的准绳。

⑤ 音束：由微复调、高密度、支声模仿、多声纠缠而成的“带状旋律”，它的更高密度、更宽频形式称为“音丛”（有的书中也叫“音簇”）。

⑥ 有量卡农：文艺复兴时期佛兰德乐派作曲家奥克冈发明，运用比例记谱法创作模仿复调的一种手法。所谓比例记谱法，就是音值按拍号所表明的数学比或增或减的记谱方法。有量卡农是在声部之间改变时值的同时还要进行模仿。

第十三章 基于徐孟东管弦作品《远籁》的频谱分析

提起频谱音乐就让人想到法国，它似乎已成为法国现当代音乐的代名词。事实并非如此，无论从历史上追溯，还是看当下的运用范围，频谱都不仅仅局限于法国，频谱音乐所代表的是一种早已经存在，并且伴随着时代发展的“科学艺术”，“音乐本身就是一门艺术科学”[①]。

追溯西方历史的本源，古希腊毕达哥拉斯学派早在公元前5世纪就已经发现了数字艺术中的音乐含义，认为“1”是数的第一原则，万物之母，也是智慧；“2”是对立和否定的原则，是意见；“3”是万物的形体和形式；“4”是正义，是宇宙创造者的象征；“5”是奇数和偶数，雄性与雌性的结合，也是婚姻；“6”是神的生命，是灵魂；“7”是机会；“8”是和谐，也是爱情和友谊；“9”是理性和强大；“10”包容了一切数目，是完满和美好。毕达哥拉斯还发现了黄金分割原理，并以此推算出太阳、月亮、星辰的轨道和地球的距离之比，分别等于三种主要的音程，即八度、五度、四度音程。我国古代春秋时的思想家，道家创始人老子（约公元前600—公元前500年间），以“道”解释宇宙万物的演变，以为“道生一，一生二，二生三，三生万物”，“道”乃“夫莫之命（命令）而常自然”，因而“人法地，地法天，天法道，道法自然”。从谐波泛音的角度看基音，它就为一，八度音为第二号谐音，五度音为第三号谐音……可见音乐从来都没有与数字艺术分离过，它们自始至终都是一个统一体，是一体的两面。自然科学的进步必然会带动音乐艺术的进步，音乐艺术的表达与更新也会促进自然科学的跃进。

从现实来看，频谱只是一种工具，频谱的普及是得益于现代科技的发展。在1665年时由英国科学家艾萨克·牛顿爵士完成了一个实验，利用三棱镜折射原理把呈现白色的太阳光分离出由红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫顺次连续分布的彩色光谱，这个著名的太阳光的色散实验振动了全世界。据此，牛顿推理出太阳光是一种复合光，其间存在各种波长（或频率）的光，这些光在介质中有着不同的折射率，这一结论使得人们第一次接触到了光的客观的和定量的特征。但是当时还没有方法精确测量这些不同光波的波长和频率，由此催生了频谱仪的产生，随着科技的进步，对客观物质

组成成分的认识从分子—原子—电子—离子—粒子—量子—纳米……不断地深入，频谱仪这一方法的分辨率也越来越高，运用也越来越广泛。至今它已经从早期的光学领域向声学、电子通信、工程学、地震学、医学、军事学……广泛渗透，随着手机的普及，频谱已经普及到了个体私人的广度，声纹识别、声纳探测、B 超、CT 核磁共振、手机 GPS 定位、北斗卫星系统无一例外地都在依靠频谱的作用。这么优秀的人类文明成果难道不应该运用于音乐艺术领域吗？这种运用只能局限于法国当代音乐领域吗？否！答案绝对是否定的。

既然频谱仪可以把复合光分离出各自的单色光，并精确测试出各自的波长和频率，那么它一定能够测试出音乐领域的任何声音，尤其适合于揭示乐器和人声发出的乐音秘密，探究其成就音色差异的根本原因，并为我们的教学和创作、表演提供最直接、实证、科学、客观的数据。这个道理早就有人知道，遗憾的是人们已有的固执以及业已形成的习惯，总会对新生事物采用排斥态度，使得代表先进的观念从来得不到一帆风顺的发展途径，只能顶住压力迂回向前。来自于功成名就的强势艺术家的压力最大，他们会天然地认为没有频谱，我照样作曲和教学、表演，而且多少个世纪以来的几乎全世界的音乐艺术家都是这样创作、教学、表演和生活的，为什么要去戴上频谱这个“紧箍咒”呢？这纯粹是自找麻烦，多此一举！

美籍法国作曲家瓦雷兹在 20 世纪初就提倡“音乐家应该和机械、电子科学家们携起手来，共同探讨新的音乐表现手段”[②]。他已经发现了频谱是一种探索途径，只因困于当时的技术条件以及所需设备的大型化、专业化所必需的大量的财力和物力的限制，故而只能寄希望于音乐家、电子科学家与机械工程师的通力合作去解决问题。至二战以后的 20 世纪中叶开始，伴随电子音乐及电子音乐实验室如雨后春笋般地在欧美发达国家相继建立，为人们声音观念的解放提供了现实的基础。乐音、噪音、微分音、电子合成；具体音乐、空间音乐、序列音乐、偶然、有限制的偶然音乐……凡此种种共同处于一个时代平台，让人应接不暇。自 1978 年美国 IBM 公司生产出第一台桌上计算机（Personal Computer，简称 PC）开始，人们就被送入了高速化发展的数字信息时代，技术革命日新月异。与此同时，五位法国青年音乐家成立了“路线探索小组”，声称要通过作曲家、演奏者与音响工程师协力合作创造出新声音世界，实现了半个世纪以前瓦雷兹的梦想，这就是频谱音乐的成因。

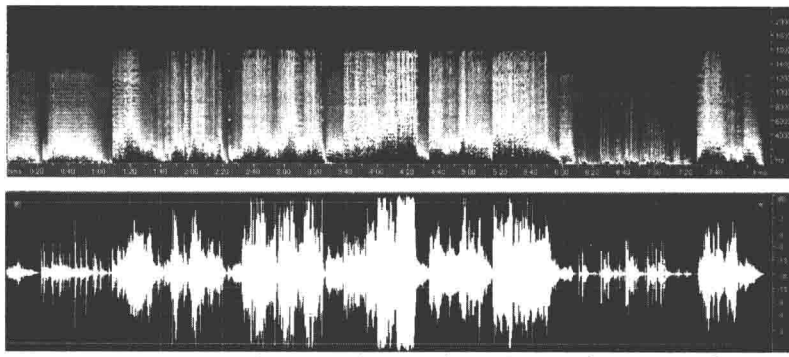
今天，这场革命伴随着性能越来越优越，价格越来越便宜的个人计算机系统在继续着，虚拟乐器、软件音源、数字信号处理与转换、交互式声

音装置、算法作曲系统在逼着我们向前迈进，任何无视这场技术革命的顽固人士，都会成为时代的落伍者。生活在每一个时代的具有责任感、使命感的艺术家，需要自觉成为时代的代表，历史的见证人，他们应该发出与所处时代相符的声音。

那么频谱到底怎么运用于音乐呢？除了法国频谱音乐的组织结构方法（先由频谱仪测试提供作品创作的结构素材及其纵横组合的客观数据，再加入创作者的主观意念去完成作品，即先组织，后作品）以外，是否可以回到频谱的本质含义上去，即“频谱就是频率的分布曲线，复杂振荡分解为振幅不同和频率不同的谐振荡，这些谐振荡的幅值按频率排列的图形叫做频谱”③。

既然频谱仅仅是一种测试手段，我们完全可以把历史上存在的任何音乐流派的音响成品作为分析对象，先过滤出一切声音客体以外的形式内容，包括音乐史、艺术美学观、风格与流派、人文、个性、背景、总谱，等等。严格以作品音响作为客体对象，实证、科学、客观地揭示分析对象的自然物理属性，而后再去与上述声音客体以外的形式内容比对、斟酌、遴选、提炼、总结出研究者所需的研究内容和结论。也就是先作品，后组织的研究方法。以下就以徐孟东先生的管弦作品《远籁》为对象进行一次频谱探秘。分析选用 2011 年 9 月第 1 版《中国当代作曲家曲库》出版总谱提供音响为准。

例 162：徐孟东《远籁》的整体波形频谱图



一　二　三　四　五　六　七　八　九　十

上图横坐标为时间轴，最小精确单位：毫秒（hms），全曲 8 分 15 秒又 97 毫秒。

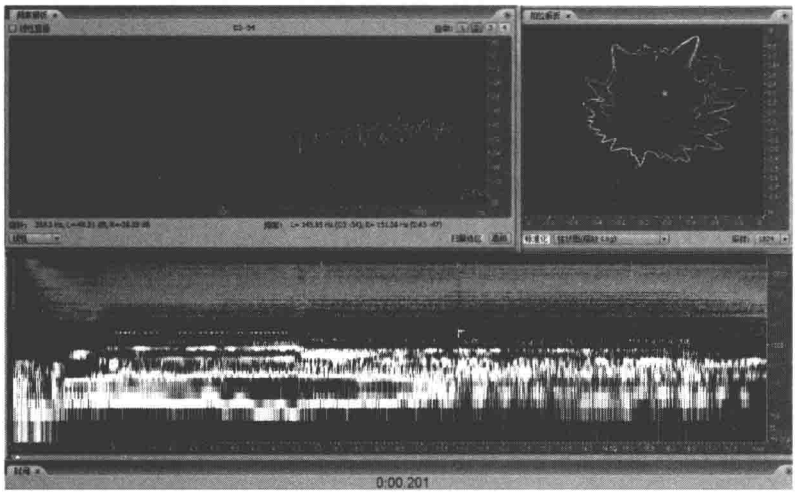
纵坐标上一半为振幅，取值范围－120—0 分贝（dB）；下一半为频率，取值范围 20—20,000 赫兹（Hz）。

可见上图是一幅拼图，为节省空间从波形显示和频谱显示中各取一个

声道拼贴而成，对照图形可以把整个作品音响分为十个部分。

第一部分：声音状态 I，0—22 秒频谱分析

例 163：徐孟东《远籁》起句 201 毫秒处频谱图取样分析



图中上方为 186—201 毫秒处频率分析（Frequency Analysis）、相位分析（Phase Analysis）微观图，窗口宽度 15 毫秒，快速傅立叶变换（FFT Size）：1024。下方为声音状态 0—18 秒的频谱呈示。

采样值率（Sample Value）44100，采样深度（Actual Bit Depth）16 Bits。

值得注意的是，频谱图呈示可以按照需要进行任意时间的提取，如例 162 的宏观呈示，优点是可以观察作品的整体结构；中观呈现，如例 163 的下面图，可以进行局部观察；还有微观呈现，如本例上部分以毫秒为单位的取样，下方部分展示也可以用毫秒展示，只因取样截图切片太多，过于繁杂，本书省略。我们还需要了解频谱谱系分析是包括频率分析（基音与泛音谐波分量）、相位分析（声场与声景）、振幅分析（力度与声压）、波形分析（合成与干涉）、时间过渡性分析（声音状态与结构）在内的所有分析，不可把频谱图仅仅理解为例 162、例 163 下方的时间·频率二维图。

例 163 之所以取 186—201 毫秒的频率、相位分析是因为在该部分，声音状态正好达到频率覆盖最大值，范围由 143.95—13,225Hz，软件标识 D3—E10，相当于传统乐理 d—e^6 全覆盖，高频远远超出了管弦乐任何一

件乐器的实际演奏音，这是什么原因呢？这正是高频谐音的作用，此处是通过金属钹的泛音染色所致，增加了高频的亮度和透明度，高频衰减非常快，约在 1.4 秒处衰减至 5,000Hz 左右保持相对稳定。那么 186 毫秒以前的声音频谱会怎样呢？事实上，正好是声音包络的第一（Attack）起奏阶段，从最初的 34.4Hz[4]通过 186 毫秒增益到达顶点 13,225Hz，保留约 34 毫秒；再从 220 毫秒处进入（Decay）衰减时段，到 1 分 357 毫秒初进入（Sustain）保持阶段，这个阶段是人为保持的，即通过演奏家控制演奏法来保持音的延长。图中 1.4—10.5 秒之间出现了相对稳定、持续的橙色变红的倍频，是由两只单簧管演奏的实际音程及其产生的结合音程（和音与差音）持续演奏产生的共振峰音组成，绿色为旁频，蓝色为间谐波。10.5—18.3 秒间同样存在大量共振峰倍频音，但是相对于前面表现出更多的离散性，这是由于弦乐组的音色高度融合，揉弦的作用使得频率出现一定幅度的偏差移动，不能保持诸如单簧管一样的稳定性，在 10.5 秒处有竖琴的点状支持，高频补偿。18.3—22 秒间是该部分的（Release）释音阶段，高中频依次消失，收拢至 34Hz，－70dB，形成分句句逗。通过分析得知，该部分的基频同时具有连续和游离性，主要在 149—254Hz[5]间移动，共振峰倍频音集中在 258—500Hz[6]范围内出现。高频谐音是以旁频和间谐波为主的离散信号。

整个第一部分体现了完整的 ADSR 包络，在作品中起到“引子中的引子”的作用。

与此相同，可以依次测试出十种声音状态的参数，根据实验得到下列统计数据。（实验步骤略）

例 164：徐孟东《远籁》十种声音状态频谱图取样分析统计数据

测试种类 / 声音状态	一 异质复合性	二 异质线性	三 异质复合性	四 异质线性	五 异质线性＋	六 异质非线性	七 异质线性	八 异质复合性	九 同质线性	十 异质复合性
时间长度（S）	22	46	29	48	60	66	42	55	76	48
基频（Hz）	149—254	65.8—238	52.5—262	55.6—245	86.13—532	42.75—531	57—533	41—880	35—242	140—258
共振峰区间（Hz）	258—600	86—900	140—1300	86—1500	100—2454	86.13—3400	172—3273	86—3300	86—2200	258—2704
共振峰主频（Hz）	258/430	129/173	100/148	215/301/430/904/1335	215/301344/516/602	129/516947/1033/1550	301/517/1464	129/301516/8611291	86/172/301/602/732	258/344
最大频率（Hz）	13225	8000	16000	16000	16000	17000	16500	16000	13000	16000

续表

测试声音状态 \ 种类	一 异质复合性	二 异质线性	三 异质复合性	四 异质线性	五 异质线性＋	六 异质非线性	七 异质线性	八 异质复合性	九 同质线性	十 异质复合性
稳定频率（Hz）	170—5000	129—6500	66—7000	55—8000	85—8000	86—10000	129—8200	129—8000	58—7000	64—8000
最小频率（Hz）	34	65	52	55	65	42.75	43	34	32	48
最大振幅（dB）	−13.35	−9.22	−8.42	−3.81	−3.49	−2.9	−6.46	−4.57	−9，68	−7.06
最小振幅（dB）	−75.32	−63.56	−36.56	−55.99	−48.63	−60.14	−61.72	−70.95	−81.62	−74.9
平均振幅（dB）	−38.00	−32.94	−21.78	−18.15	−13.89	−13.53	−16.37	−14.78	−31.21	−19.92
相位（°）	48°	80°	70°	60°	54°	75°	60°	58°	90°	80°
谱线特征	直射·散射−	带状折射散射	波射·散射＋	衍射·散射	散·直·折射	散·波·折射＋	波射·散射	带状折·波·散射	直·散·折射	带状折射散射
音响特征	清	清	中清	清	浊	浑浊	浊	中清	高清	清

注意：

1. 表中的最小频率有时比基音还要低，这是由减法合成构成的结果。

2. 表中基频标识的是基频范围，在相应时间内基频在此范围内移动。

3. 共振峰主频是指共振峰区间内振幅最强的共振峰，相对弱一点的共振峰音因数据太多表中未记录。

4. 稳定频率是指频谱谱线在共振峰区间内，且具有连续性特征的频率。

5. 相位提取的是声源中心发出的相位角度数，从例 163 中可见若从声音辐射理解它们都是 360。

6. 谱线特征：

直射——振幅最强，多由直达声组成，呈高光橙红色。

折射——振幅相对减弱，多因介质密度改变而改变，由反射声加部分直达声构成，呈黄绿色。

衍射——特殊的折射，除了继续存在直达声外，反向折射的现象也存在，呈绿色。

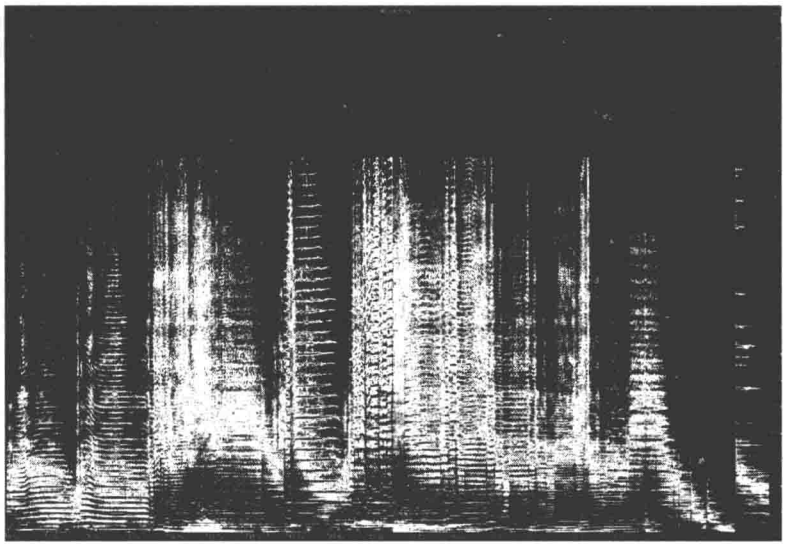
散射——振幅继续减弱，由高频谐音构成，以粒子形式，蓝色呈现。

波射——振幅相对减弱，谱线连续改变方向，形成曲线传播，在上述各种颜色中都可能出现。

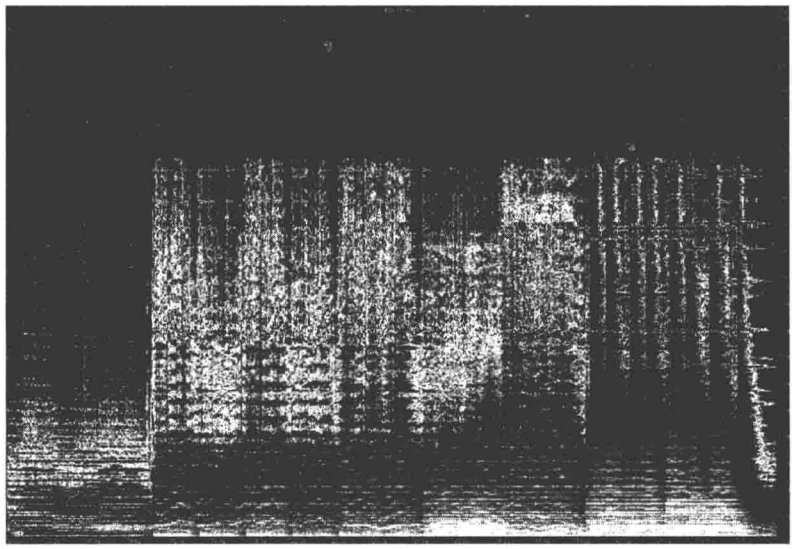
由表中可知独奏乐器（第七部分大提琴 Solo，拨奏）在全曲中时值最长，起华彩作用。也是整首作品音响最清晰之处，由于没有别的音色干扰，乐器的本色个性得到充分发挥，共振峰形成的各自倍频都非常清晰、透明，使得相位角扩散也达到全曲最大的 90°，这段达到了“四两拨千斤”的作用，非常精彩。

除此以外的九个部分都属于异质复合音色，乐器种类越多，清晰度越弱，其中的第六部分独奏及乐队协奏唯一一次全编制齐上（木管组、铜管组、弦乐组、打击乐组全奏），使得纵向频率得到高密度的叠加组合，频谱以散射、波射为主，音响达到最浑浊状态，不协和程度及紧张度都到达最高，形成全曲音响的最高点。参见例 165。

例 165：徐孟东《远籁》第四与第六部分对比频谱图



声音状态四频谱图·衍射为主谐音清晰



声音状态六频谱图·散射为主干涉显著

虽然九个部分同为异质音色，但组织方法有别：

线性—复合—非线性，密度的浓淡，频率带宽的宽窄，振幅动态的大小，相位覆盖的收放，同时进行多维度的立体调控变化，使得各部分音响间具有一种“立象以尽意、神似形不似”的中国传统美学意蕴，让人回味无穷！

以上借助频谱作为分析的手段，实证性地提取了徐孟东先生管弦乐作品《远籁》十种声音状态的实验参数，在未做音本体（总谱）对照、甄别的情况下撰写。这是基于两个原因：

1. 有关本作的音本体分析已有多篇研究成果⑦，在此无须赘述，读者可参阅相关论文及总谱对比阅读。

2. 有意想凸显频谱这种手段的科学性，借助它可以提供“眼见为实”的事实依据，加之人们的主观能动性，作曲家“道法”的有效运用，我们完全能够达到：可视的音乐，可闻的总谱之境界！

注释：

①② 摘自埃德加·瓦雷兹《音响的解放》，周文中编注，焦侃译，《天津音乐学院学报》1996 年第 1 期，第 17—25、19 页。

③ 中国工控网（http：//www. gongkong. com）。

④ 通过软件 Adobe Auditong 转换测试为大字一组升 C1－12 音分。

⑤ 相当于传统乐理小字组 d 至 b。

⑥ 相当于传统乐理小字一组 c^1－24 音分至 b^1。

⑦ 张大龙：《灵动、简洁而富于文化意蕴——从〈远籁〉看徐孟东的室内乐创作》，《人民音乐》1999 年第 11 期，第 17—19 页。李吉提：《绿葱葱，几颗樱桃叶底红——徐孟东四首音乐作品对我的启示》，《人民音乐》2008 年第 4 期，第 40—43 页。徐孟东：《远籁》为大提琴与交响乐队而作，《中国当代作曲家曲库》，2011 年 9 月第 1 版。

第十四章 肖武雄第二交响乐《台风》[1]的案头设计

笔者更愿意把频谱音乐原理称为外延与内涵更宽泛深刻的科学艺术原理，既然自己选择研究它，当然不能把研究仅仅局限于理论领域，必须自己勇于跳下水亲身实践，以期得到第一手直接经验。但是真真切切地去实践还是面临非常多的困难。首先，法国频谱音乐流派不是靠一己之力，一蹴而就“蹦”出来的，它是一代又一代人传承、革新的结果。其次，法国政府始终如一地支持艺术与电子音乐的创新研究，闻名遐迩的法国国家电子实验中心IRCAM众多科学家、工程师持续不断的研究成果和数据揭秘使得作曲家逐渐知道了声音深层本质的规律，进而为音乐创作开启了一条科学辅助之路，这是频谱音乐得以产生和发展的最坚实的基础。然而我们国家由于种种原因至今都没有成立能够完成类似于IRCAM实验室一样任务的音乐声学与技术研究中心。这不是一己一院的事情，更是一个城市、一个省、一个国家高度需要重视的问题，它作为一个新型交叉学科，其研究内容需要工程、声学、电子、艺术软硬件各方面人才通力合作，才能得到无愧于劳动的基础成果。现在的IRCAM成为法国及世界各国研究现代音乐创作的职业作曲家、理论家向往镀金的圣地，然而笔者却没有去过。

创作必须进行，怎么办？

能够先期把不同的管弦乐器各自音色全部研究，得出它们的频谱、振幅、相位、谐波系列、时间过渡特征等实证参数吗？即使笔者有此想法和时间也没有硬件和技术支持，只能运用多年学习软件的经验积累做简化过程的粗略研究，找到力所能及的实践体验，以便了解、验证、掌握基本原理。另外，频谱音乐的创始人杰勒德·格瑞瑟和提斯坦·缪哈耶认为频谱音乐只是一种态度，不是体系也让我有胆量去冲破实验条件缺乏，技术支持不足的壁垒，说我能说之话，做我力及之事，创我想写之作。把理论研究的最新成果嫁接移植到中国风格上来，2006年8月10日，在东南沿海地区，登陆的一次超强台风“桑美”[2]撞开了自身创作的冲动与潜能。

选择一次台风事件作为创作主线，不是因为台风本身，而是因为当时的媒体对于诸如此类的重大自然灾害、人员伤亡所报道的不像2008年汶川

地震之后全面放开，当时还是比较闭锁的。民众需要实情，需要尊重，需要以人为本，需要告慰亡灵……国内对重大灾情报道的完全放开是2008年的汶川地震事件，面向世界的超常规滚动立体实时报道，不仅没有动摇人民的意志，危害国家的稳定，反而把全国人民团结在一起，同心协力，抗震救灾。也让全世界看到了一个在地震面前，挺起不屈脊梁的中华民族众志成城、互助互爱、共克时艰、自强不息的民族精神。这是一个让世人尊敬、自豪和敬畏的民族。然而2008年前，我们却没有显示出这样的自信。作品创作是想用音乐的形式来记录、祭奠、反思这一事件。

一、音高素材

频谱音乐的音高组织是非常重视基音及其产生的谐波系列的关系，无论是用实验的手段，还是根据实验得到的原理，自行设计具有声场共性的音乐都是如此。反过来理解就是知道掌握了这些原理，并不一定需要每一个作品都必须去做声音测试。有一些作曲家片面理解频谱音乐，害怕自己陷入陌生的计算、实验之中而排斥这种手段，进而也就排斥了科学建构声音纵横组织的方法，回到自己熟悉的传统调式、音阶、功能、集合、序列之中去组织音高素材。事实上，懂得了频谱揭示的原理以及声音的一般属性，完全可以人为地去设计音阶组成，就像运用炒菜的秘方一样去烹调自己喜欢的风味菜系。不同的是，这一秘方会随着科学技术手段的不断进步，声音本质属性的不断探秘而不断升级换代，靠近本源。重要的是，在这一过程中的所有阶段性的发现，都可以并且一定能够转化为谱写宇宙生灵的音乐作品，艺术与科学在不断地进化中相互结合，这是社会与人类精神进化的必然规律。

对于乐器声音属性研究反映的一般基本原理表现在以下几点：

1. 任何乐音都是一个独立的生命体，有其“产生—成长—衰减—消失”的整个过程，这个过程最易为人所察觉的就是音高（最大共振峰倍频频率），音色（谐波系列之关系），音强（声波振幅强度），声场造型（声音直射、折射、衍射、绕射，直达声和反射声与声场环境造成的相位组合）。

2. 同一个乐音产生的声场中存在许多与基音远近不等的谐波系列，在系列之中与基音靠得越近的谐音，振幅越强，音程越协和。

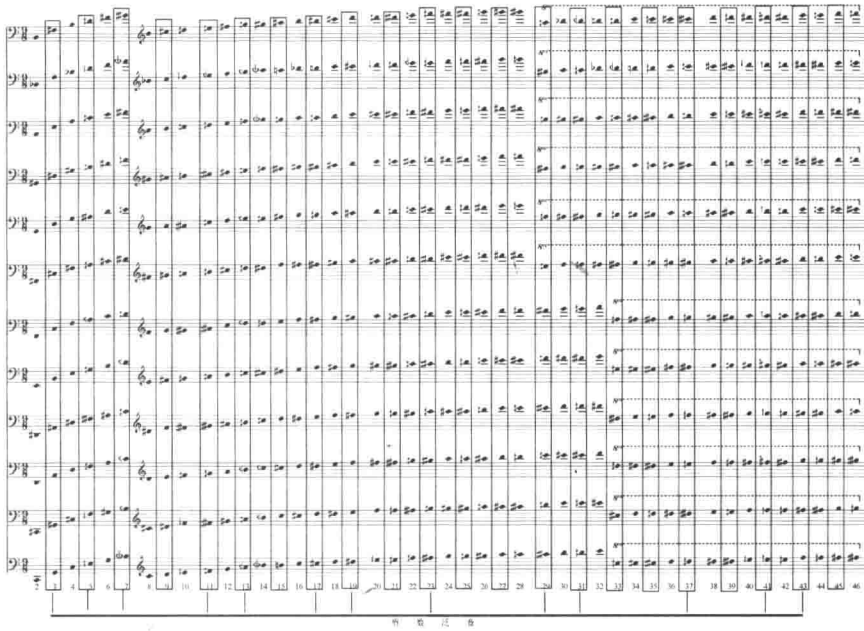
3. 谐波系列序号为奇数，尤其是质数的谐音振幅，在没有发生声音失真的情况下，要比相邻偶数谐音振幅强。

4. 谐波次数越高，振幅越弱，相邻波次音程距离越小，音程越不协和。

根据这个原理结合“协和结构的等级划分”[③]，笔者先期设计了“十二

基音泛音矩阵”。

例 166：十二基音泛音矩阵



谱例分别以十二音为各自音源的基音，推理出前 46 号泛音，其中的奇数泛音都用黑框线标识出来。量化标准取序号为前 30 的音组成倍频和旁频和弦，31—46 号组成间谐波和弦。前 30 号泛音又根据奇、偶序号分成两组，奇数（包括质数）振幅强的组成倍频和弦，再根据和弦的紧张度组成两个 7 音组和弦；偶数为较弱振幅的泛音，它们组成两个 5 音组和弦。我们已经知道，成 2 倍数的泛音为同音名高八度。那么前 30 号泛音真正具有独立意义的音只有 15 个。以大字一组 C 为基音，与奇数序号相互对应的泛音音名如下（注意已做了八度调整）。

即：

音序数	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
音　名	C	G	↓E	dbB	D	♯F	dA	B	♯C	♯D	♯C	♯♯F	G	A	♯♯A

谱例中的微分音变音记号按照升、降种类可分为两种记谱方式：

A：升种类（依次升高八分之一音）

B：降种类（依次降低八分之一音）

以上十五音就构成了同源、同胚、同声场的音高序列。

同理，可以得到十二个半音任何一个为声场基音的 15 音序列。

二、和弦划分

和弦分为三种类型四个协和等级，即：

协和结构——由简单倍频和弦构成（传统和声中运用的三和弦、七和弦等低序号泛音也属于此类和弦）。

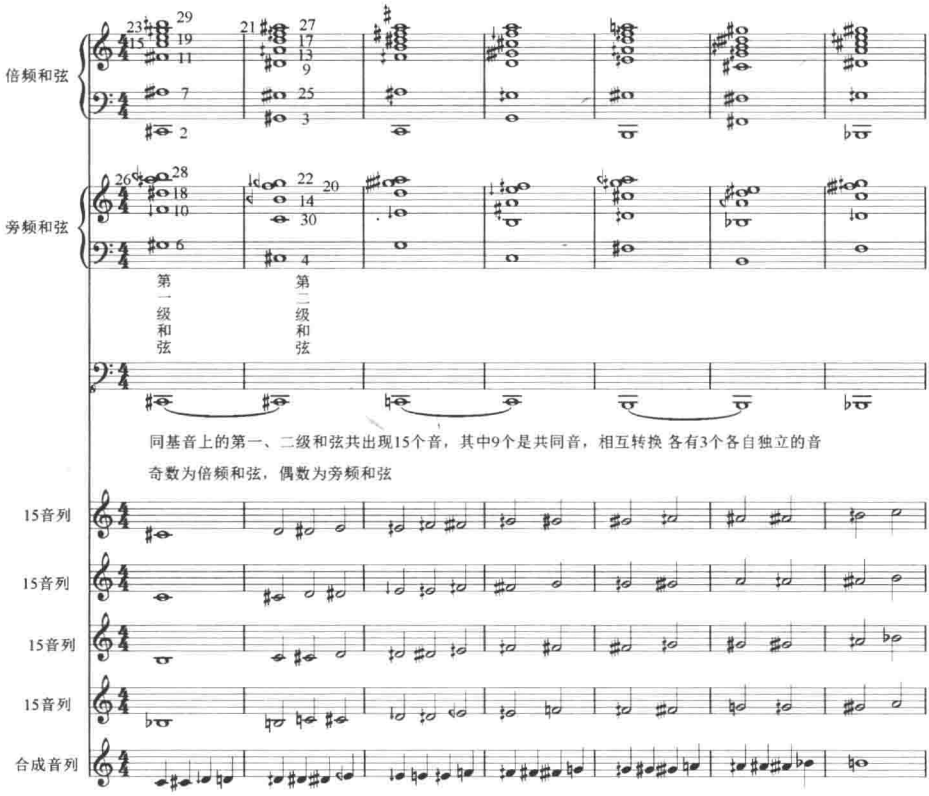
不协和结构——由复杂倍频和弦构成。如本作品设计的原始和弦，泛音范围扩展到 30 号，音高出现八分之一音。

二级不协和结构——由旁频和弦构成。主要由偶数序号泛音构成，它们振幅相对弱，相互干扰较强，不协和性也增强。

三级不协和结构——由间谐波和弦构成。本作品取 30 号以后的泛音组成间谐波和弦。

参见例 167。

例 167：第二交响乐《台风》原始和弦设计



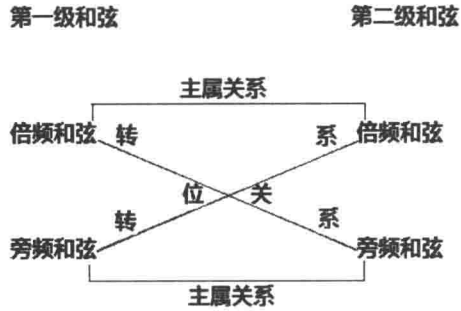
谱例中的第一行大谱表为倍频和弦，第二行大谱表为旁频和弦，第五行低八度低音谱表为基音。

第六至第九行为原始和弦四个基音出现的微分音列，最后一行为四个原始基音音列的合成音列。可见，从音高素材角度看，它已经从十二平均律的束缚中解放出来，微分音在其中主要起结构作用，同时也兼有音色组合作用。

谱例第一列为第一级和弦，第二列为第二级和弦，它们都来自于同一个基音升 C_1，属于同一个声场的不同面。

仔细对照分析，会发现第一、二级倍频和弦的最低音相隔五度（也就是泛音 2 与 3 号的关系）。第一、二级旁频和弦的最低音也是相隔五度（泛音 4 与 6 号的关系）。

可见五度是和声连接的最近关系，传统和声学把它称为“功能关系”（如正格、变格进行）。本作品在基音消失的情况下也可以继续沿用这种关系，也就是说可以把同谱表内的第一、二级和弦互看为类似传统和声中的主属关系一样，不同谱表的第一、二级和弦却是同声源的转位关系。



注意：这里的“主属”只剩躯干而无传统的调式意义了，调已经不存在，而是“声场”在起作用。

同基音——同源声场；异基音——异源声场；基音消失——无源声场。

同时这里的“转位”并不仅是传统和声的音位移动，如 2 号变 4 号，3 号变 6 号，7 号变 14 号再变 28 号……还有一些音没有参与转换，如第一级旁频和弦的 10 号泛音，并没有在第二级倍频和弦中出现，而是在第二级旁频和弦中以 20 号泛音出现。这是基于三个原因设定的。

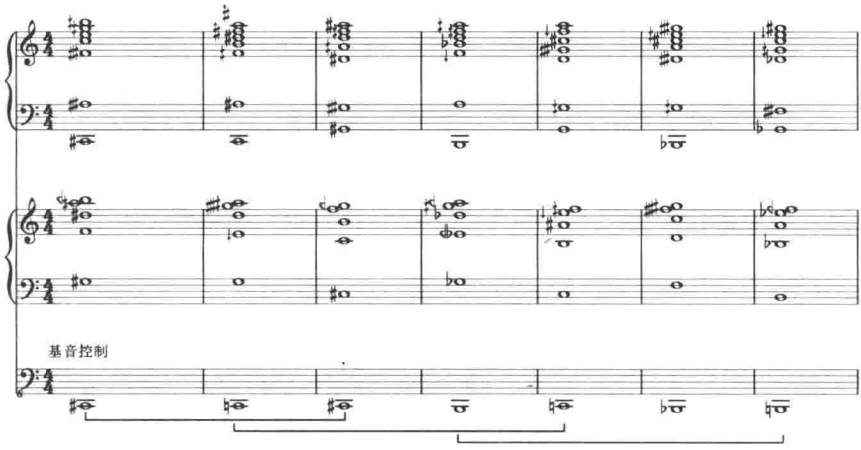
1. 根据泛音与基音的远近关系
2. 根据泛音的振幅强弱
3. 根据倍频与旁频和弦的和音数

一般情况下，和弦组成由低音区到高音区泛音序数号逐渐增加，谱例中第二级倍频和旁频和弦出现的 25 与 30 号泛音例外，它们是为了音区布局做了音域移动。另外，本作品设定倍频和弦为七个音组成，而旁频和弦只有五个音。因而有的音根据以上三个原因，需要剔除。

作品的核心骨架结构力因素仍然是基音，即例 2 出现的半音下行四个基音（升 C—C—B—降 B）是作品的核心骨架，它们就像是四个独立的“声场”控制着自己的和弦色彩以及和声连接逻辑依据。

第二个结构力因素是由上方四个基音变异而来。为了追求和弦色彩变化的“微差性”使人在不易察觉之中，渐变和弦的色彩，把倍频和弦调制成微分音微差逐步变化，基音变成为“C—升 C—B—C”，音级数为 1—2—1（半音上行——大二度下行——半音上行），参见例 3。

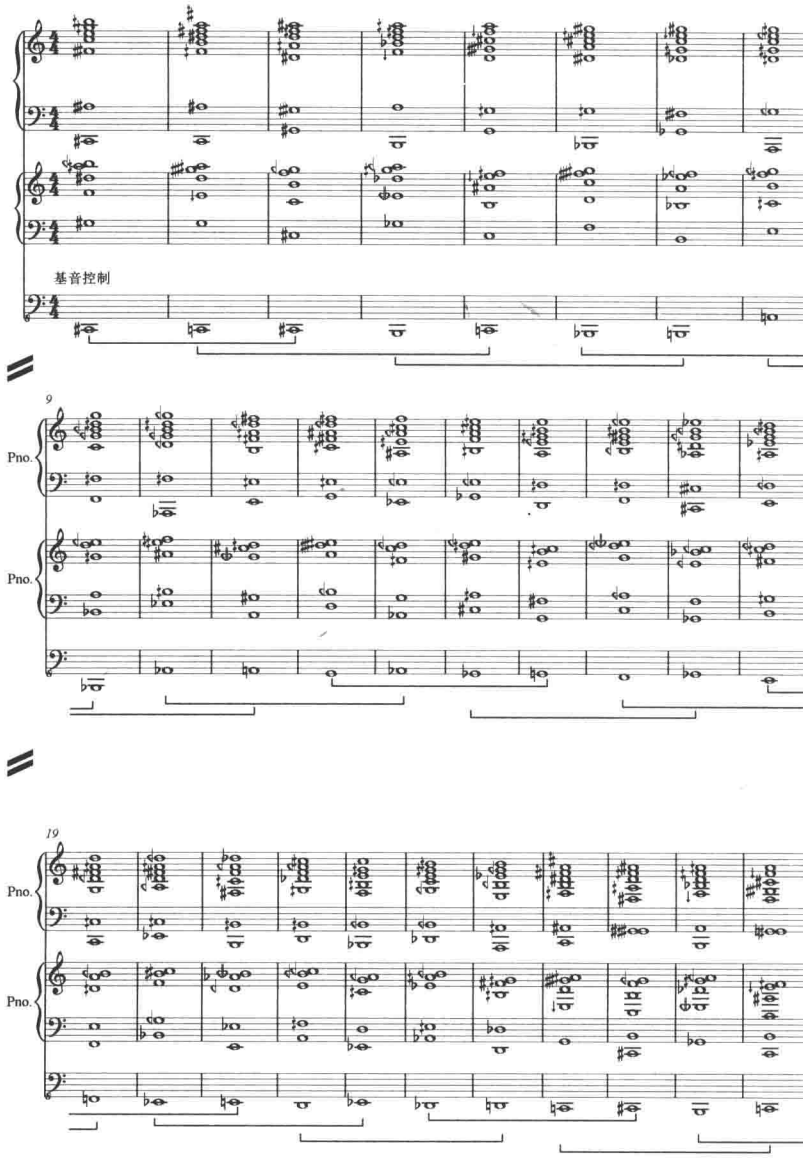
例 168：调整倍频和弦高音声部微分音下行的和弦模式



该模式逆行就能得到高音声部微分音依次上行的和弦结构。

上述两种结构力因素各自都可以在十二音基音范围内依次循环，得到同类型衍生和弦。

例 169：高音声部微分音下行的矩阵和弦模式



可见虽然基音是在十二音范围以内，但是由此产生的中、高频和弦都是具有微分音结构的和声进行，其产生出来的音响也是具有独创性的，会把人们带进一种全新的境界。

上述两种结构力基音线条仅仅具有一维性，在作品创作中还使用了二维乃至三维结构力基音因素来纵横编制音响织体，使其服务于作品内容的音响刻画。比如把基础基音四音列的原型与自身的逆行、倒影、倒影逆行

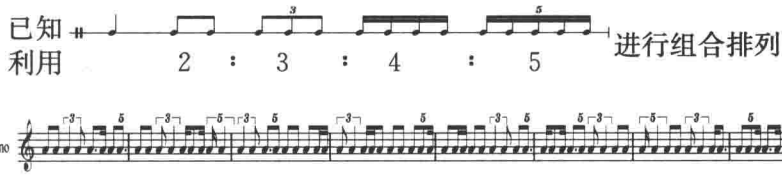
结合使用，就能构成二维面、三维体、四维场多维时空的音响造型与再现。不难看出，和弦的组织与连接逻辑都已经超越了功能和声、十二音序列、音级集合等已有理论成果。为音响创新奠定了基础。

倘若要加大和弦对比度，还可以根据需要改变基音的发展连接关系，可谓海阔凭鱼跃，天高任鸟飞，它赋予我们艺术想象的翅膀尽情在自由、无限时空中翱翔。

三、节奏组织

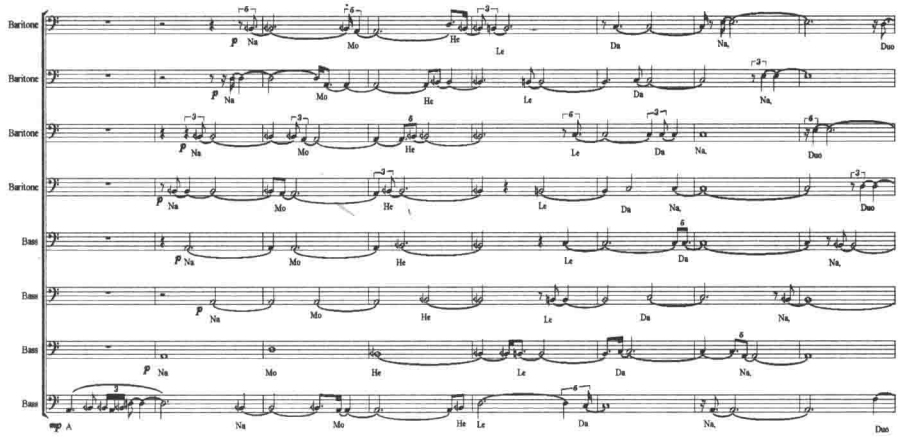
节奏组织是保证作品时代性的重要参数，任何墨守成规、四平八稳、简单重复的节奏都与这个时代进步的脉搏不相吻合，我们需在适应所处时代先进文化的要求上，面向未来自由地跳跃。不求超越时代之前，但也不能落伍于时代之后。

例 170：排列组合节奏



得到上述节奏原型，这种节奏组织除了第一、二小节有意保持一定元素重复以外，后面六小节各不相同，追求一定的对比性。

例 171：排列组合节奏纵向分离构成自旋律声场



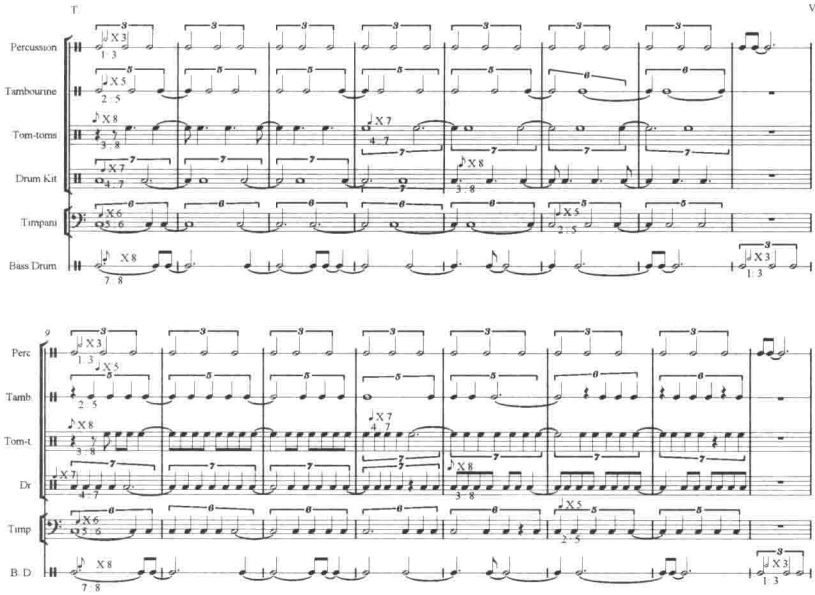
为了模糊旋律，作品把例 170 设计的排列组合节奏纵向分解到八个声部，形成男中音、男低音同质音色合唱（例 171 所示），它们附加共鸣，相互衬托，形成自旋律和声声场，气息悠长，缠绵回荡。曲中歌词选自藏传

佛教梵音【大悲咒】，曲调借用了西藏嘉绒藏族民歌素材。作品陈述开始处之所以没有直接运用前面设计的音高及和弦划分素材，原因在于笔者想追求一种电影蒙太奇的手法，用民俗自然与人工设计来强化异时空突置对比。这既保证了广义民族性，又为赋予时代性的声景造型预留了伏笔，同时也为整个作品的“淡入”做了铺垫。

例 172：排列组合节奏的进一步繁化

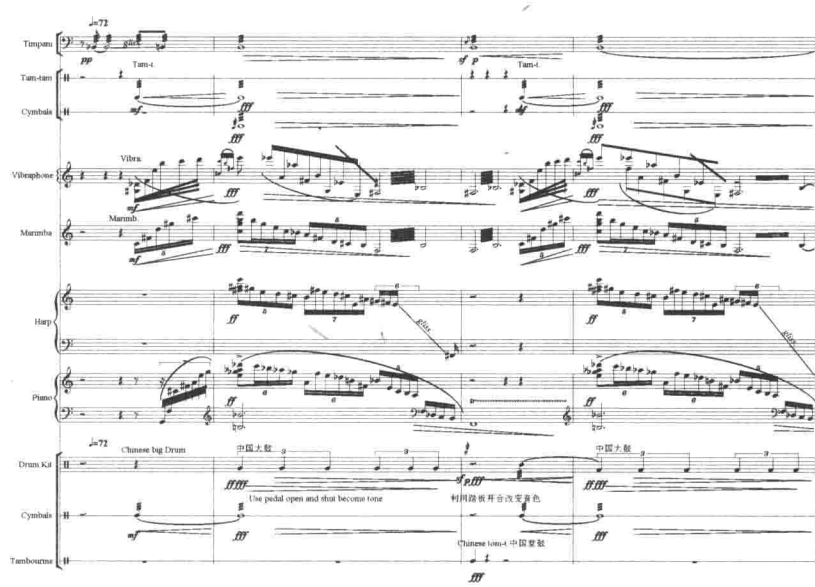
| | | |

例 173：奇偶矛盾节奏



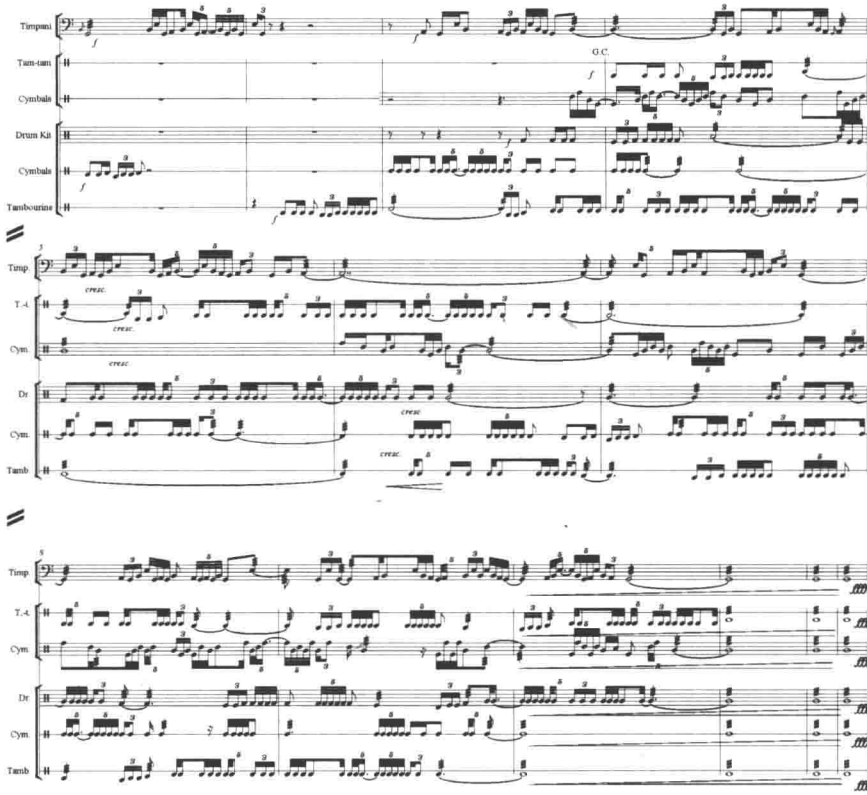
谱例上一半为原型，下一半为变形。声部间按照 3：5：6：7：8 的关系组合，发音点力求错开，保证各声部音色独立性，为点彩涂鸦做预制。

例 174：不协和节奏　摘自总谱第 171—174 小节打击乐部分



各声部节奏独立，相互间构成不能整除的发音点数，线条相互交织，且具有一定的自相似性，形成直达声与 N 个反射声缠绕的马赛克面域织体。

例 175：打击乐对位节奏　摘自总谱第 390—403 小节打击乐部分

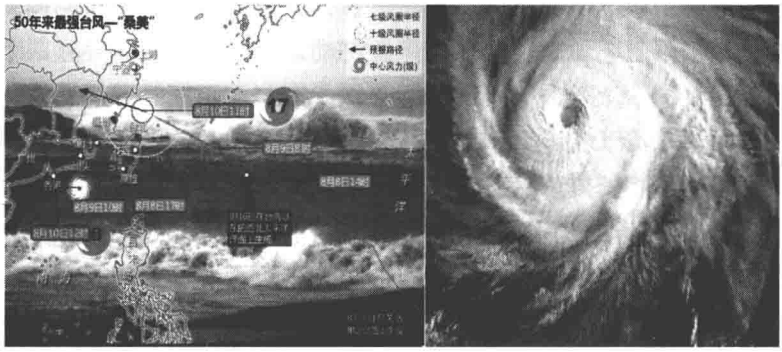


此处，震耳欲聋的打击乐组与管弦乐队（乐队谱篇幅太大未截取）在刻画“由粉色噪音向白色噪音”挺近的时间过渡音响造型，共同推向全曲音响最不协和的高潮出现。刻画人们面对大自然灾害的凶残杀戮，咆哮肆虐所表现出的惊恐无助、惶惑无主与极致的绝望。非旋律化的音响造型更擅长表达此类内容。

四、曲式宏观布局

我们知道曲式也是具有时代性特征的又一个重要因素，用已有的老瓶来装新酒，其创新意义会大打折扣。但是如果完全使用节奏组织中的预设语汇以及声音状态的阶段造型又会陷入早期频谱音乐的“自我繁殖”单调化串连之中，这与中国人的听觉习惯相去甚远，也不符合事件陈述类的作品写作要求。作品需要听众去理解和记忆，即使是追求阻断、分裂、交叉、多项嵌入、重叠、蒙太奇等目的而使用的音响造型，也不能把听众完全拒绝在音响逻辑以外，而是要符合情理的意料之外。为此，笔者求助自然现象本身，从台风属性中去提炼一个宏观的曲式布局。

例 176：超强台风“桑美”2006 年 8 月 10 日登陆东南示意图



台风登陆路线　　俯视台风截图

“台风是一个强大而深厚的气旋性漩涡，发展成熟的台风，其底层按辐合气流速度大小分为三个区域：①外圈：又称为‘大风区’，自台风边缘到涡旋区外缘，半径约 200—300 公里，其主要特点是风速向中心急增，风力可达 8 级以上。②中圈，又称‘涡旋区’，从大风区边缘到台风眼壁，半径约在 100 公里，是台风中对流和风、雨最强烈区域，破坏力最大，风力可达 12 级以上。③内圈，又称‘台风眼区’，半径约 5—30 公里。多呈圆形，风速迅速减小或静风。”[④] 台风生命周期一般包括孕育阶段—发展阶段—成熟阶段—消亡阶段，台风登陆指上述外圈尤其是中圈移动到陆地上时称为“台风登陆”（逆时针旋转・右旋风），通常会造成第一轮持续数小时的肆虐入侵。然后是内圈风眼（或称“风洞”）登陆，雨过天晴，短暂平静，常常会让不识海况的内陆人士产生错觉，以为灾难已过，失去警惕。这是超强台风“桑美”造成重大人员伤亡的原因之一，因停泊在港的渔船上多为内陆打工人员在坚守，自然知识的缺乏使得他们错误地过早实施援救措施，进而成为风眼以后的台风（左旋风）再次登陆的牺牲品。如民间渔民谚语：“台风不叫大，回南才叫大”，第二次的破坏力更加惊人。

作品采用倒叙，借以时空错位的手法，设定一个中轴对称的宏观布局：

天　　堂

祭奠——突袭——风洞——再袭——升华

右旋风——人——左旋风

地　　狱

第一部分祭奠与第五部分升华，首尾呼应，采用以人声为主的混合音色，演唱藏传佛教梵音【大悲咒】，表现今人对往事的祭奠、反思，不同

的是，前面的淡入，乐器开始仅使用弦乐四重奏形式由点及面，淡雅渗色，追随人声情绪渐入佳境。突然，铜管、木管、打击乐组强制闯入，地狱恶魔般地极限阻断，时空轮转，昔日灾难造成的满目苍凉突置眼前……作品使用了许多蒙太奇的手法来多维交织、割裂、阻断、重组、泛化音响事件。同时不拘泥于交响乐体裁的限制，采用“乐队里面套乐队”的手法，按照空间声相安排乐队人员及合唱队、民乐演奏家的位置。独奏、独唱、重奏、重唱、小型室内乐、大型室内乐、同质音色合唱、混声合唱、西洋三管交响乐队与民乐组合等体裁，应有尽有，力求做到音响音色组合的多样性、灵活性，追求个人极大化的艺术想象！第五部分升华的“淡出”处理，使用的是减法。有对客观对象台风消失的声景重现，更有对亡灵的悼念，对天灾人祸的回问。

第二部分（突袭）的材料已经提前预制在第一部分之中，其中，风的孕育，未被人们察觉和重视，祭奠活动还在惯性延续。待警报响起，台风魔影已经兵临城下，惊慌失措的人流无序逃命……台风主体登陆右旋风所向披靡，吞噬生灵。本部以乐队全奏为主。

第三部分（风眼）以大型混合室内乐为主，纯女声梵唱《摩诃般若波罗蜜多心经》，观自在菩萨，照见五蕴皆空，渡一切苦厄。

第四部分（再袭）左旋风以全乐队加混声合唱为主，第一次以“写实的方式”来刻画灾难的残酷性。此部将达到全曲高潮，挑战人们听觉的极限感受。

整个宏观布局中分割有若干插部来阻挠、转折、分裂、模糊、多维叠置、时空交错事件的发展过程。

五、线条的模糊

现代艺术慎用清晰，崇尚涂鸦与模糊，追求更加不协和以及反差对比更强的音响体验。上述音高素材的提取，和弦组织与划分的方式，节奏组织，曲式的宏观简化与微观繁化无不是在追求富有逻辑性、艺术性、科学性的模糊原则与实现手段。在此，再陈述一种作品中使用的基音控制，多维声场的模糊实践。

仍旧以基音线条“C—升 C—B—C”（参见例 3）为例，我们已经知道这根线条代表的不仅仅是这个一维基音线，还代表它们控制的声场，我们姑且把它们简单地理解为倍频与倍频、旁频与旁频、简谐波与简谐波、倍频与旁频、倍频与简谐波、旁频与简谐波共六组关系。

也就是说，在声场[5]中存在上述六种和弦关系。借助这种思维，完全

可以用基音线条来控制整个作品纵横组织的整体结构，浓淡疏密都可以自我控制。更大的一个好处在于，它与传统和声学理论并不矛盾，传统和声学的调式和弦表现的仅仅是基音的简单倍频谐波泛音的关系。就是信频与信频的关系，这其中已经全部囊括了传统和声学的所有内容。应该说这一关系还大于传统和声学内容，因为，倍频泛音还包括较复杂倍频音的关系，而传统和声学仅仅是研究了前 9 号倍频泛音的规律，高叠位和弦不过到 13 号而已。相对而言，和弦预制（例 2、例 3、例 4）中的任何一级和弦都比传统和声学中的和弦更不协和、更模糊。但是，这些预制和弦仍然属于一维基音线条控制。

在织体肌理中还可以构成二维、三维基音线条的交叉、混合声场控制。比如使用原型基音线条与它的移位、倒影、逆行、逆行倒影之间构成的变形基音线条的对位，它们可以复合构成更宽频域范围，更高密度的和声声场。倘若在乐器音色使用以及力度控制上配合适度，能够随心所欲地塑造各种梦幻般的音响音色化合游戏，前景可观！注意在具体使用上，控制声场的基音在场，不在场都行。就像一般的乐器都能演奏自己的基音，但是，长号就不能演奏自己的基音。然而长号演奏的所有音高都受基音控制，都是基音产生的谐波泛音。基音提供了一种原则和规律，基音不在场，也必须按照原则与规律办事！这是声音世界的自然规律。“艺术形式愈是接近各种艺术体裁的本质，愈能够在自然的手法与目标中保持其纯正的特性，其生命力愈为长久。”[6]

六、声景化织体探索

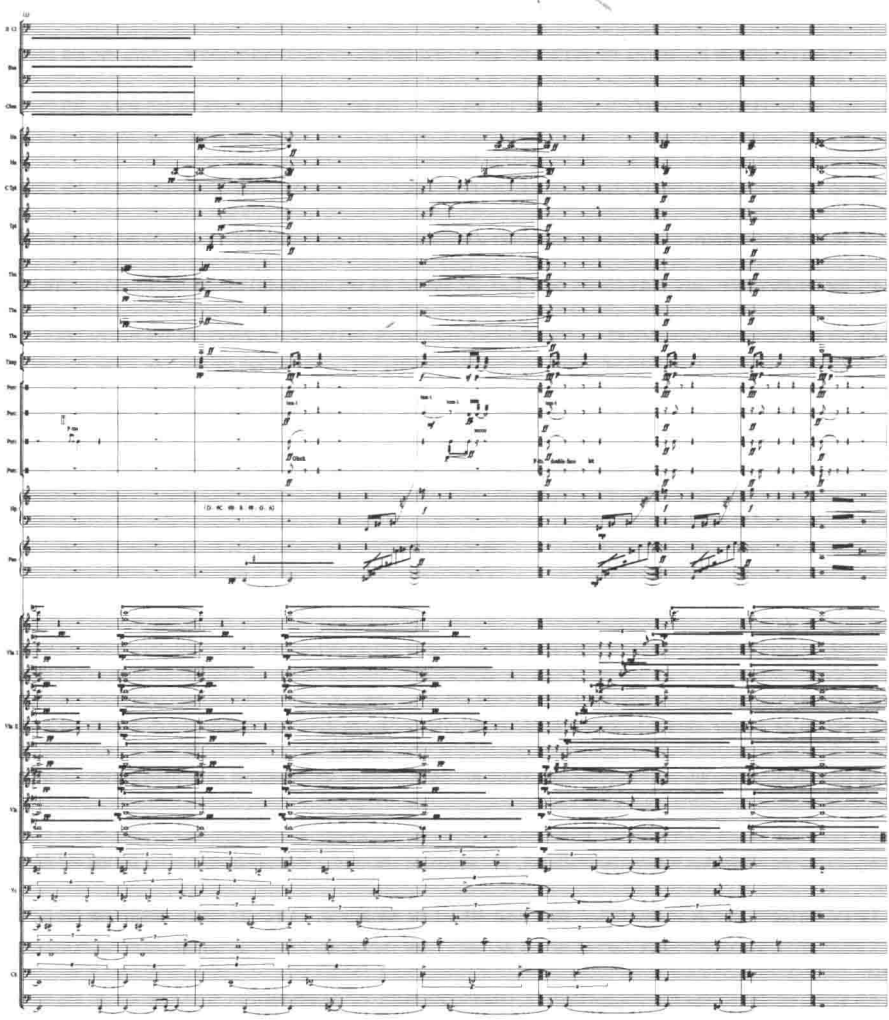
有过创作实践的朋友都知道在已知音高素材、和声、曲式、复调以及作曲家的感性经验与理性平衡的基础上，还有一个重要的难题堵塞在当下，那就是如何去表达？使用什么样的织体语言？可能有人会说，好的作曲家的创作不需要专门的配器，而是立体思维，一蹴而就！配器就是作曲本身，是连体劳动。我认可这种情况存在，就是本作品的创作也是立体进行的，没有后期配器之说。但是并不意味着不需要织体设计，倘若织体语言仅仅局限于个人的经验之谈，是可以仅凭感觉直接出手。如若需要自我超越就必须要前期研究学习大量作品，尽力拓展自己的视野，补充修缮自身的知识结构。为此，创新织体语汇必须要有先期预制。

声景化的织体肌理就是科学与艺术相互渗透的结果。现代音乐作曲家受当代科学技术进步的影响，越来越重视对“声音本体”的认识，自觉地去利用配器的手段去反映“声音生态学”的自然规律，使得常规管弦乐乐

队发出了有别于前辈所有经验的新音响，好似插上了电，运用了功放、调音台及各种效果器一样，把传统的双声立体声改编成了 2.1、5.1、7.1 乃至 8.1 环绕立体声效果。仍然是一样的乐队，一样的人数，一样的乐器，在传统不插电的音乐厅演奏，却能发出如电子乐器一般的声响。这已经成为现代音乐的“身份标识”，需要我们去重视。

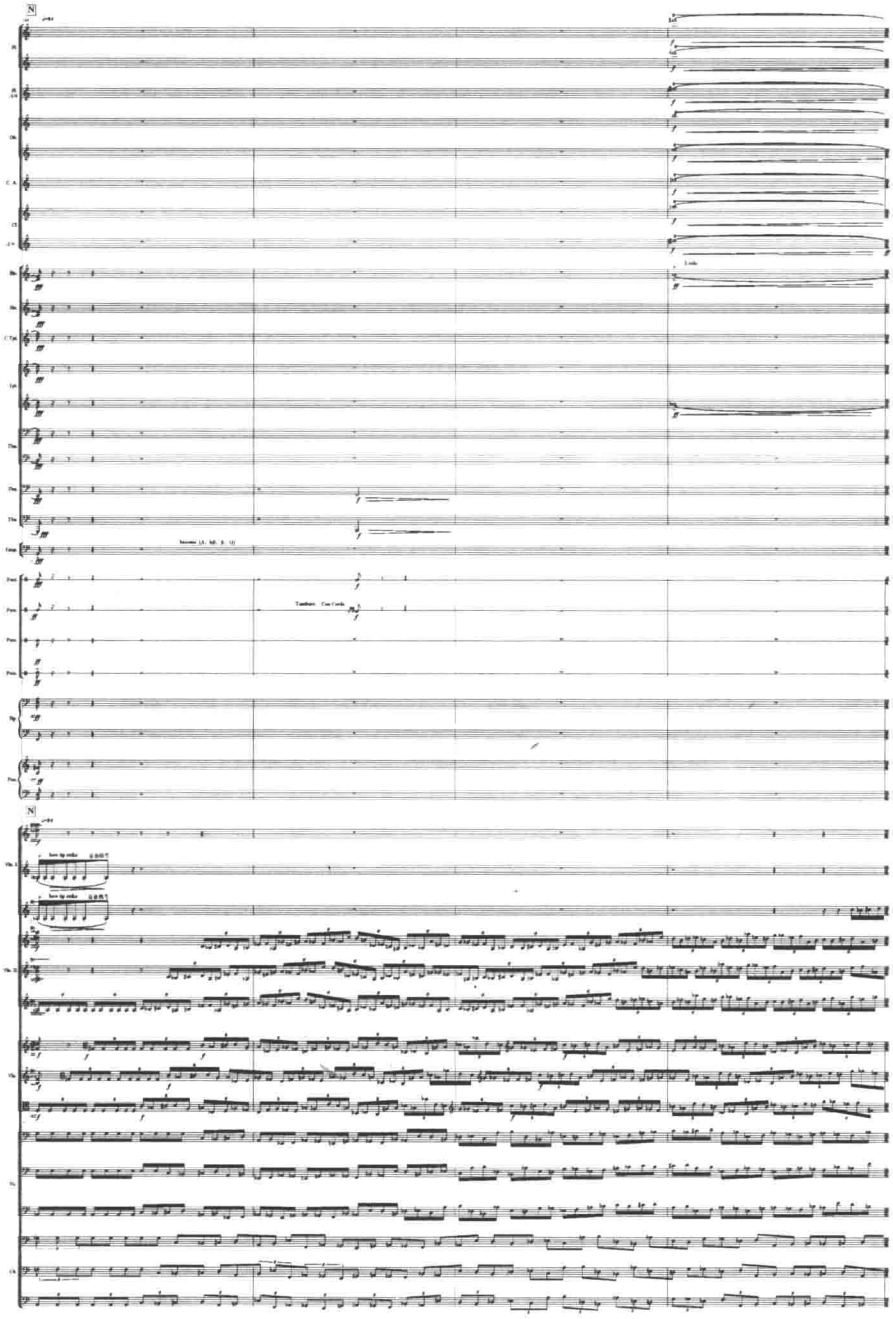
以下截取作品中关于台风肆虐过程的三个瞬间声音造型为例，进行说明。

例 177：台风成长　摘自第二交响乐《台风》总谱第 16 页



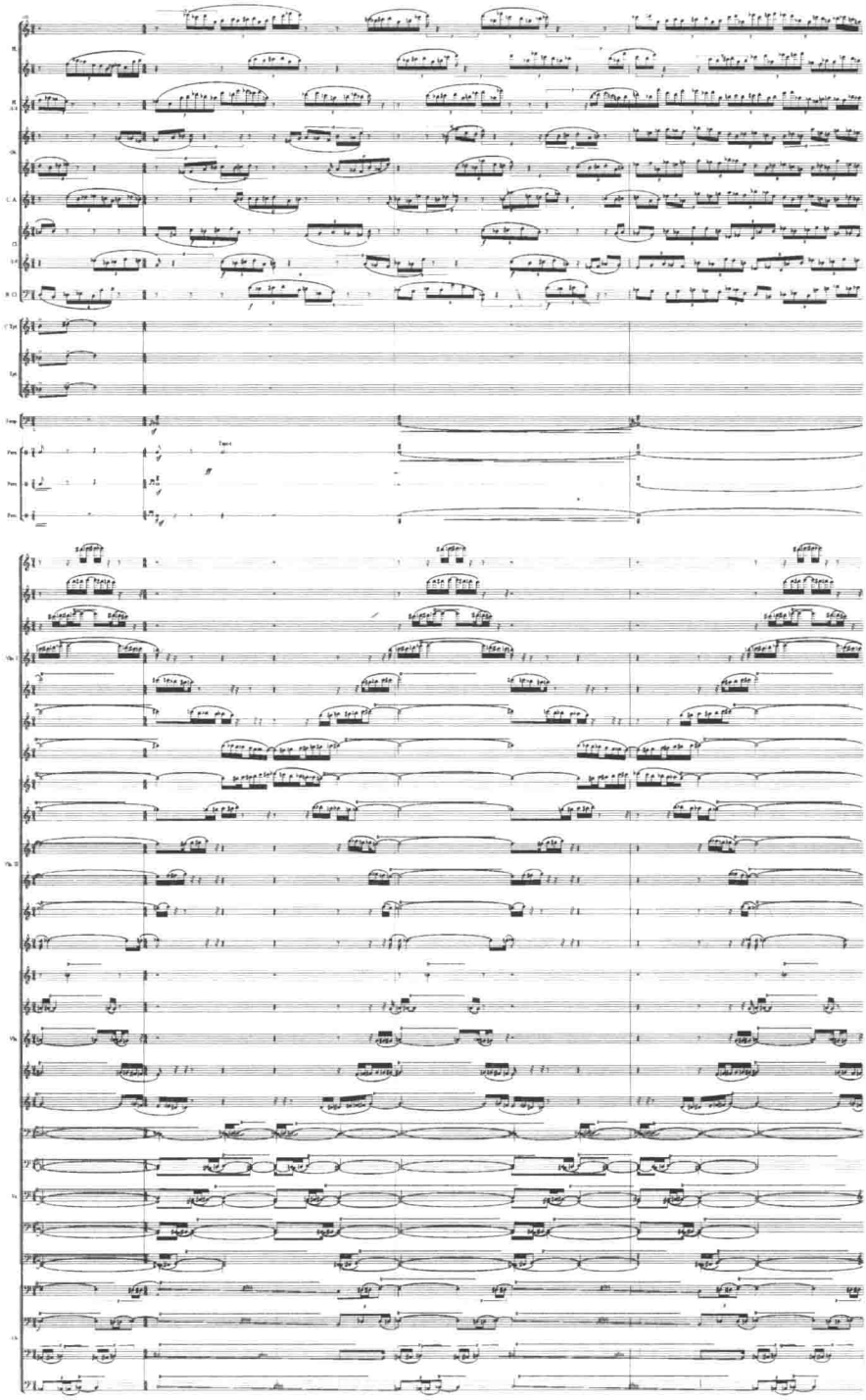
台风的成长利用了乐器组的错位递增、高低频拉锯、铜管组带状持续、打击乐起奏强调、键盘乐颗粒渲染以及弦乐组颤音扇状增减构成的相互干涉作用来刻画。

例 178：台风突进 摘自第二交响乐《台风》总谱第 17 页



台风突进使用弦乐组分奏“无序增长挺进”，木管组“有序高低频染色”，铜管啸叫，打击声部滚奏，交织超越，构成滚滚洪流，呼啸而至……

例 179：台风旋转扫荡　摘自第二交响乐《台风》总谱第 22 页



谱例中木管声部在环绕，弦乐声部在无终循环，刻画一种紧迫的音响氛围，铜管的嘶叫及打击乐的催命骤击更加剧了天灾人祸的惨烈，乐谱织体为了内容的需要，用音响“还原的手法”把听众带入灾难场景中去体验和玩味。这是现代音乐直接受惠于现代科技的成果，创造出的一种“视在的语言”，使得音响、音色属性分解成更加细微的，可供量化操作的具体指标，进而深化发展了音色音乐的组织方法，使得音乐迈向更纯粹、更透明又更模糊的境地。这类声景化的织体音响完全放弃了旋律的作用，转而强调整体音响的意义与造型。

以上对于第二交响乐《台风》的创作实现进行了梳理与总结，该作品的特点是：多维渗透、数控发展、矩阵生成、纵横贯串、音响造型、声景重现、彼岸升华、此岸体验、天堂地狱、凝聚三三⑦。仅此代表一己之见。

注释：

① 第二交响乐《台风》创作于2007年，是笔者在上海音乐学院研读作曲与作曲技术理论博士学位期间创作的一部大型交响乐，为三管编制的管弦乐团、三位华乐演奏家、三个合唱团而作。

② 台风“桑美”，风力达到了17级，中心风力更是达到了惊人的19级，风速达到了68米/秒，成为了新中国成立以来登陆我国最强的台风。“桑美”所过之处，到处都是墙倒屋塌，一片狼藉，大树被连根拔起，护栏钢筋被扭成麻花，那些漂在海上的渔船，顷刻沉没！曾经的避风港变成死亡港。

③ 参见第一章《频谱基础》之1.3《协和结构》。

④ 引自百度百科（http：//baike. baidu. comview951. htm）。

⑤ 无论是只有一个基音的同源声场，还是由两个（或两个以上）基音构成的异源声场。

⑥ 引自《音乐艺术新美学论稿》（节选），意大利作曲家、钢琴家布索尼著，姜丹译，杨立青校，《音乐艺术》1988年第2期，第42页。

⑦ 三三：表示本作品需要演奏33分钟。

第十五章　混乱中的秩序，秩序中的无序

——论陈晓勇音乐作品体现的组织原则

“混乱中的秩序，秩序中的无序”是陈晓勇先生2013年夏季应邀来首都师范大学音乐学院讲学自己确定的主讲题目，题目内容不仅反映作曲家对创作技法组织方式的思辨，更在于他把声音本体为大家公认的已有成果与20世纪的最新物理学成就“浑沌学”相结合，发出了艺术科学与哲学层面的追问，使得我们有机会了解一位严肃、思辨、先知先觉的作曲家的艺术观念、个性语言、理论体系的形成过程。借以为后生才俊提供鲜见的成功经验，同时指出一扇通向现代之门！

20世纪物理学永放光芒的三件事是：相对论、量子论和混沌学的创立。由理论物理学家爱因斯坦于1905—1915年间提出的相对论否定了经典力学的绝对时空观，深刻地揭示了时间和空间的本质属性。同时，发展了牛顿力学，将其概括在相对论力学之中，推动物理学发展到一个新的高度。1928年，物理学家狄拉克将相对论运用于量子力学，后经多位科学家的发展，建立起适用于解释原子结构、原子光谱的规律性、化学元素的性质、光的吸收与辐射等领域问题的量子力学论，它们给物理学带来了革命性的变化，共同奠定了近代物理学的基础。成熟于20世纪70年代的浑沌学强调物质世界的演变进化过程对初始条件的敏感依赖性，把偶然性和必然性集于一身，说明有序和无序的对立统一，对确定性系统中出现的内在“随机过程”形成的途径、机制进行科学研究，提出“蝴蝶效应”[①]之理论。这些承前启后的理论成果使我们对物质世界有了更深一层次的认识，为我们研究自然的复杂性开辟了一条道路，同时也因其令人着迷、令人激动、发人深省的想象力和迷人的美学色彩，以及其深刻的科学内涵和内在的哲学魅力激发出人们浓烈的求知欲，影响着越来越多的领域。至今，在数学、物理、生物、金融、经济、管理、天文、气象、国际政治关系、运输、艺术等领域都在广泛运用这些理论成果。

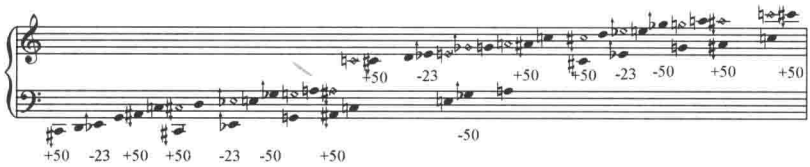
艺术与科学总是相辅相成，不可分割，互相促进，不断融合，协调发展。著名科学家爱因斯坦曾经说过，科学家可借艺术之瓦，攻科学之坚；艺术家可借科学之梯，攀艺术之峰。也就是说，看似感性的艺术和看似理性的科学之间并没有一条深深的鸿沟，两者做到极致之后是相通的。最高

明的艺术，一定是符合科学家所发现的自然法则；而最艰深的科学，也能从中窥探到壮观瑰丽的艺术魅力。比如音乐中使用的平衡、再现原则渗透出经典力学理论；世界音乐，民族音乐的兴盛，摧毁了“欧洲音乐文化中心论”得益于相对论的运用；频谱及频谱音乐是量子力学的体现；微型复调、音簇涂鸦，它们表面看似无序，其内部却存在着惊人的自相似性，本质就是浑沌学的折射反映。陈晓勇留学德国的专业导师乔治·利盖蒂（Gyorgy Ligeti）正好就是微型复调的发明者，他的惊世骇俗管弦乐作品《大气》就是浑沌学作用于音乐艺术的最好说明[②]。陈晓勇继承了恩师衣钵，继续在艺术科学领域的创造实践中丰富、完善具有自身个性化的音乐语言，勤耕不辍，追求卓越，多年创作积累的系列作品记录了他的思想和组织方式的变迁，这也是天道酬勤的必然结果。

一、核心材料的显性与隐形原则

对核心材料的遴选与重视是历代作曲家共同的特点。陈晓勇不同的地方在于，他不仅仅把这些组织材料局限在传统四大件的显性领域，而是把它拓展到超越它们的隐性领域。他思考何为音乐的组织？是音高、时值、强弱、调式、功能关系吗？是！又不完全是。说是，是从传统音乐理论角度理解的结论，它表现出音乐作品组织原则的显性特征；说不完全是，是从现代科学艺术理论出发，音乐作品的组织结构还存在许多不易为人所知的隐性特征，如存在于总谱背后的音与音之间的过程、密度、化合、谐波系列、包络、相位、干涉……以下就陈晓勇 1989 年为小提琴和筝而作的二重奏，筝的定弦作为切入口探个究竟。

例 180：《Duet for violin and zheng》筝的定弦[③]



从谱例中看出，筝的定弦是建立在五声基础上的微分音结构。

五声基础：C—D—E—G—A

用频谱的观点来看就是倍频谐波构成的第一集合，属于一级协和结构。

围绕着基本音级上下方分别存在增加 50 音分和降低 23 音分以及降低 50 音分的微分音，它们形成旁频音高，对倍频构成干涉作用，增强了其音

响的不协和性。同时它们也如“精密仪器”一样，把量化单位从十二平均律（相邻音平均相隔 100 音分）引入到更为精细的微观世界，使其过程刻度的量化标准更加精准。通过例 180 显性音列材料可以看出作曲家对传统的继承与创新，创新契机来源于对“声音生态学”的追求，正如他所言：“东方思想观注的不是事物本身，而是事物生死变化的整个过程，我的音乐材料不是音符，甚至不是声音，而是音符与声音塑造的感情，我们要重视事物的关系及它们的连续性，而不是孤立地看事物。重视事物的非线性（指数、对数关系），而不是线性关系。”[④] 如果说上面的显性音列不是作曲家创作作品的材料，那么作曲家“音符与声音塑造的感情”如何去量化呢？

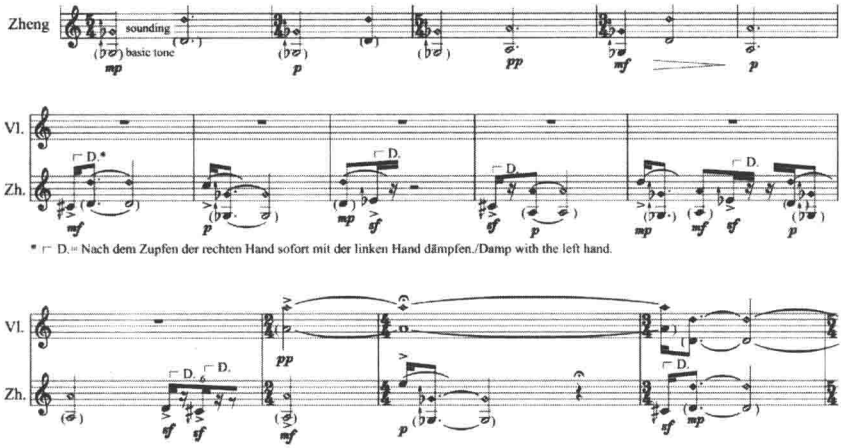
众所周知，音乐作为动态表现的听觉艺术，它有别于静态再现的视觉艺术，需要更多作曲家及听众的意象、经验、抽象去完成它的创作与欣赏全过程。而不需要依赖具体的形象而为人们所接受。作曲家强调创作过程中所激发出来的感情，事实上是当代艺术主流价值的体现。许多抽象艺术家宣称他们描绘的是人类肉眼看不见的宇宙的宏观和微观世界。的确，我们凭肉眼看不见宇宙星际间的结构，也看不见细胞、病毒、分子、原子和电子的形态，但这些在工业文明之前人类闻所未闻、见所未见，甚至想都未想的东西，都被现代科学证明是客观的真实存在，正是它们带来了现代工业文明，也正是它们改变了人类的生活。相对于本作品而言，实现作曲家创作意图，记录其创作过程，承载感情密码的技术手段是继承传统汲取精髓！

转向科学需求答案！

创新是艺术的第一要务，但创新不是惟新，它需要汲取传统文化精髓的营养，作曲家曾说：“作为一个人，我觉得，不管在哪种行业里，成功与否除了自己的努力和勤奋外，重要的是这个人是否顽强，是否有个性。在中国，外族的多次统治也没有把本文化的根伤掉，而是产生出不同的结合。从中国近代史可以看出，中国从来没有很长时间的模仿期，即使有短暂的仿效，但马上就又回到本来的根处。人也如此，该具备这种素质。音乐海报上的标题说我是世界人，但是我有我的文化之根。”“创作根植于中国传统文化，却又回避‘中国制造’的‘标签式’音乐。”[⑤] 这些都记录了作曲家对于传统精髓的再度提炼和主动追求。大音希声、清微淡远的中国传统音乐艺术给予作曲家取之不尽用之不竭的动力源泉。中国传统音乐的自身衍变，旋律和声，微分韵律，章回聚散，虚实相映，音色化合的玄妙过程不断启发着作曲家寻根问祖探索答案……另外，他自觉地转向科学，

从当代科学的理论与实践成果[6]中去寻求精确记录量化的技术手段，并与艺术结合，进而找到了自身独特的艺术语言。就本作而言，筝的音色就是中国音乐文化的象征符号，它无须再用传统方式来定弦，而需产生一种新的音响去呈现作曲家的主观表达以及意蕴、风骨。琴弦的微分设计具有科学依据。

例 181：二重奏乐谱材料呈述[7]　总谱第 1 页

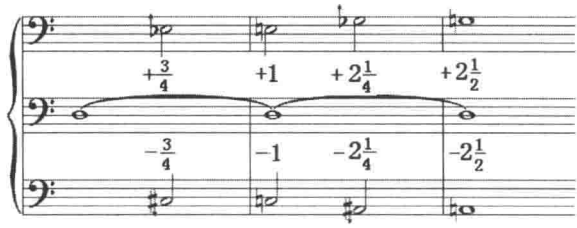


表面看起来，乐谱提供的仅是音高、力度、演奏法信息，这与传统作品没有差异。其实不然，乐谱除了这些显性信息以外，音与音的关系，力度级的反差对比，特殊演奏法的运用都蕴含有许多当代科技发现的秘密。从频谱理论我们已经知道：在基音的谐波系列中，倍频、旁频、间谐波是同时存在的。其中的倍频主要起共振峰泛音作用，旁频与间谐波主要承担音色修饰作用，它们身影相随共同作用构成的频谱时域和频域变化包络决定音质变化的过程。上例的真正基音是 D，作曲家为了强调它的存在，从大字组 D 到小字二组 d^2 三个八度里，共分配了四根独立的琴弦（D—d—d^1—d^2，参见例 180）。这是绝无仅有的现象！其他音域的音高多用八度泛音来填充，很少用独立琴弦来分配。由此，可以把例 180 的 34 音音列看成是基音 D 的谐波系列，换句话说就是基音 D 的声场，比 D 音还低四分之三音的升 C 及比 D 高四分之三音的降 E 怎么解释呢？两个都是旁频，分别由减加法合成。34 个音归类统计事实上是由一个九声音阶构成。参见例 182。

例 182：二重奏・九声音阶

这个九声音阶又是以 D 为中轴构成的完全“镜像对称”。

例 183：以 D 为中轴构成的镜像对称



可见 D 是声源，它向 360°的空间发散，形成以它为中心的声场，九声音阶就是一个基音声源控制的亲缘系统。阴阳两级终点（正负二又二分之一）正好到达下属音与属音，微分律制与平均律制，旁频、间谐与倍频，力度的强与弱，演奏的虚与实，乐器对位的聚与散，音色二重的东与西，把古今中外的文明成果有机融合，由此可见作曲家设计的精妙。

二、自相似性原则

自相似性是混沌学最主要的理论成果之一。意思是宇宙中的万事万物，其内部（部分）与整体之间从不同的空间尺度或时间尺度来看都存在相似性。比如自然界中的油漆、泥裂、云、鸡冠花、花椰菜、树叶，医学界的无性繁殖、基因克隆……同样，在音乐艺术领域自相似性早就已经存在，主要是通过作品的组织结构及音响再现表现出来。如贝多芬的“动机分裂”，勋伯格的“主题一致性”，基本乐理中的音程特征，传统和声学中的三和弦、七和弦无不是自相似性的表现。从音乐分析的角度出发，自相似性应该解构到构成作品的最小单位，类似于电子图形学中的“取样精度”。随着历史的进程这种取样精度同样在音乐作品中有相应的表现。比如，汉族五声性调式的自相似性从音程角度看是通过大二、小三、大三、纯四度及它们的转位音程表现；七声性调式音级是以小二、大二、小三、大三、纯四、增四度及它们的转位音程表现；十二平均律的自相似音程本质上也是这六个；二十四律的本质音程是在六个特征音基础上再增加六个微分音共十二个组成。

即：

音素 $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{2}$ $\frac{3}{4}$ 1 $1\frac{1}{4}$ $1\frac{1}{2}$ $1\frac{3}{4}$ 2 $2\frac{1}{4}$ $2\frac{1}{2}$ $2\frac{3}{4}$ 3
音名 ♭C #C #C ♭D ♭D #D #D ♭E ♭E #E ♭F ♭F #F ®来表现。

同理，四十八律就有二十四个特征音程构成本质因素，参见下表：

例 184：以八分之一为最小单位的四十八平均律数字对称图

奇妙的音乐数字对称									
序号	音名	音程度数	乐理音素	所含八分之一音的个数		乐理音素	音程度数	音名	序号
0	C^1	纯一度	0	0		48 6	纯八度	C^2	48
1	C^1↑1/8		+1/8	1		47 5·7/8		C^2↓1/8	47
2	C^1↑1/4		+1/4	2		46 5·3/4		C^2↓1/4	46
3	C^1↑3/8		+3/8	3		45 5·5/8		C^2↓3/8	45
4	$\#C^1$	小二度	+1/2	4		44 5·1/2	大七度	b^1	44
5	$\#C^1$↑1/8		+5/8	5		43 5·3/8		b^1↓1/8	43
6	$\#C^1$↑1/4		+3/4	6		42 5·1/4		b^1↓1/4	42
7	$\#C^1$↑3/8		+7/8	7		41 5·1/8		b^1↓3/8	41
8	d^1	大二度	1	8		40 5	小七度	$^bb^1$	40
9	d^1↑1/8		1+1/8	9		39 4·7/8		$^bb^1$↓1/8	39
10	d^1↑1/4		1+1/4	10		38 4·3/4		$^bb^1$↓1/4	38
11	d^1↑3/8		1+3/8	11	中轴对称	37 4·5/8		$^bb^1$↓3/8	37
12	$\#d^1$	小三度	1+1/2	12		36 4·1/2	大六度	a^1	36
13	$\#d^1$↑1/8		1+5/8	13		35 4·3/8		a^1↓1/8	35
14	$\#d^1$↑1/4		1+3/4	14		34 4·1/4		a^1↓1/4	34
15	$\#d^1$↑3/8		1+7/8	15		33 4·1/8		a^1↓3/8	33
16	e^1	大三度	2	16		32 4	小六度	$^ba^1$	32
17	e^1↑1/8		2+1/8	17		31 3·7/8		$^ba^1$↓1/8	31
18	e^1↑1/4		2+1/4	18		30 3·3/4		$^ba^1$↓1/4	30
19	e^1↑3/8		2+3/8	19		29 3·5/8		$^ba^1$↓3/8	29
20	f^1	纯四度	2+1/2	20		28 3·1/2	纯五度	g^1	28
21	f^1↑1/8		2+5/8	21		27 3·3/8		g^1↓1/8	27
22	f^1↑1/4		2+3/4	22		26 3·1/4		g^1↓1/4	26
23	f^1↑3/8		2+7/8	23		25 3·1/8		g^1↓3/8	25
24	$\#f^1$	增四度	3	24		24 3	减五度	$^bg^1$	24
				同行内项·和=48					
			左右乐理音素·和=6						
		左右音程度数·和=9							
左右音高移动反向对称·改变记谱可形成顺·逆（升·降）时针双向旋转									
左右序号·和=48									

上表把 C^1—C^2 一个八度音域空间均分为四十八份，每一个最小单位为八分之一音。

传统乐理记为 1/8，即 C^1 至 C^2 一共 48 个 1/8。

以中轴为准，左右两侧严格镜像对称，逆时针旋转音程逐渐增加一个单位（1/8），顺时针旋转音程逐渐减少一个单位（1/8）。

升 f 与降 g 为等音，音程含量与序号都完全一样。

以上计算了一个八度（六个全音）按照十二、二十四、四十八平均律划分的情况，即：

6×1＝6（一个八度有六个全音）

12×1/2＝6（一个八度有十二个半音）

24×1/4＝6（一个八度有二十四个四分之一音）

48×1/8＝6（一个八度有四十八个八分之一音）

上述划分是按照二分法来进行的，倘若不是按照二分法，而是奇数的划分情况又会怎么样？

18×1/3＝6（一个八度有十八个三分之一音）

30×1/5＝6（一个八度有三十个五分之一音）

42×1/7＝6（一个八度有四十二个七分之一音）

54×1/9＝6（一个八度有五十四个九分之一音）

66×1/11＝6（一个八度有六十六个十一分之一音）

78×1/13＝6（一个八度有七十八个十三分之一音）

……

1200×1/200＝6（一个八度有一千二百个二百分之一音）（1/200＝1音分）

……

神奇的 6！无论怎么划分（按偶数、奇数、质数做均分）都能得到中轴对称的音列。而且永远能分割下去——日取其半，万世不竭。

即一个八度包含 6n 个 1/n，[n∈∞]

数学表达为：6n×1/n＝6

由此可见音乐的自相似性是由“数”[9]来表现的，“数”是音乐的根本。如毕达哥拉斯所言：“音乐的美与和谐只能到‘数’的关系去寻找。”[10]那么音乐与数还有什么关系呢？音乐作品中的自相似性如何表达？何为它的最小单位？最小单位如何包含预示整体的属性？要解释这些问题必须先搞清楚两个概念。

1. 维度（dimension）

维度就是我们分析的目标对象所采用的分析角度，又称维数，是数学中独立参数的数目。在物理学和哲学的领域内，指独立的时空坐标的数目。

点：是0维，没有长度。表明音乐中绝对的“点”（静止的单音）[11]是不存在的。

线：是1维，只有长度。表示音乐中的音程距离，如微分音，自然音程，等等。

面：是2维，由长宽的两条直线（或曲线）构成的面积。表明任意音向空间两个方向发展都会出现的相应面积。

体：是3维，由长宽高三条相交的直线（或曲线）构成。表明任意音向空间三个方向发展都会出现的相应体积。

场：是4维，三维的世界是静止的，当三维世界以时间为基准发生变化时，四维空间就产生了，如果把时间看作一根轴线，则这个轴线上的任意一个点，都是一个三维空间，也就是说无数个三维空间依据时间轴线集合，构成了四维空间。

传统乐理把自然音程限定在十四种之内，即“一四五八无大小，二三六七没有纯，外加增四减五”[12]。同样，把音乐演奏的时间最低细化到“秒”。这些单位对于极限认识的分形理论而言太过“粗糙”，不准确。当代科技的测试手段，要求各参数精密计算，更加细化，从而找到“最小的自相似性”。认识从极限更接近事物的本源。

2. 分数维（fractal dimension）

19世纪，数学家们发现了分形，由此创立了一种新的维度，“分数维”，人们由此意识到，维度不只是整数，还有可能是分数，甚至可能是无理数！英国著名物理学家史蒂芬·霍金教授有这样的解释：这就像一根头发，远看是一维的线，在放大镜下，它确实是三维的；如果面对时空，如果有足够高倍的放大镜的话，也应该能揭示出其他可能存在的4维、5维空间，直至11维空间。相对于音乐而言微分音就是分数维，理论上可以细分到无穷，即$1/\infty$。但是从人们可以感觉和演奏的角度出发，微分音到1/8精度，从创作和演奏上说就已经够用了。从律学角度上说却还需要精细到1/200精度，这正好是一个音分的单位，也是全世界律学通行的精度单位。尽管微分音还可以细分下去，那也是运用于军事科学领域，于音乐作品而言反倒成为了累赘，故而基本不用。

时间维度，同样可以精细到微妙、纳秒……但针对音乐组织的频谱分

析软件使用的最小单位是毫秒。它们的关系如下：

1s（秒）$=10^3$ms（毫秒）$=10^6\mu$s（微秒）$=10^9$ns（纳秒）

3. 域（domain）

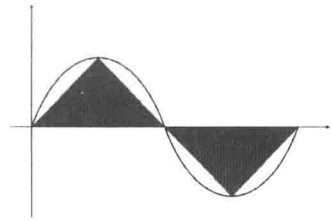
域本身也是一种维度，指客观事物存在的空间范围（静态和动态两种范围）。一切声源都在震动，所以，构成音乐作品的任意一个组织参数都是运动的。音乐艺术领域涉及的域及维度都是具有生命的，具有自身的起始过程，其过程之中反映出的相对稳定属性更值得我们重视。总谱记录的只是谱面静态的域，需要在二度创作变成音响时，才能实现动态赋予生命的域。

点：就是“无”，没有运动，没有生命，也没有域，即零时空。

线：对应“线域”，在一维条件下，大无终，小也无终（极限接近零）。

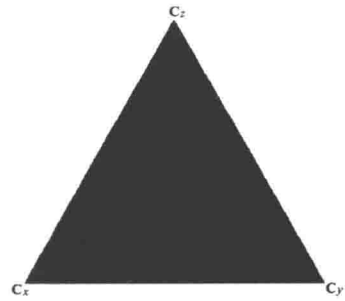
面：对应“面域”，只要琴弦震动，无论琴弦多长，哪怕它短到极限，它也有波峰、波谷及平衡中点，倘若把三者连接起来得到的就是二维面域。如下图：

例 185：纯音震动产生的三角面域



我们已知乐音中包含 N 个纯音，即琴弦全长震动时，弦上的“N 段点”都能产生自己的谐波泛音，所有各段的震动都能构成属于自己的“三角面域”，微分音构成微分三角形，全音程构成全音三角形……下面取一个等边三角形来进一步研究。假设边长等于一个八度。

例 186：八度等边三角形

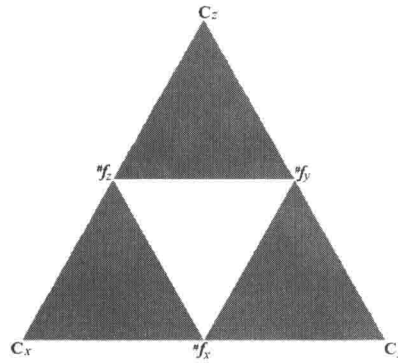


$C_xC_y = C_y\ C_z = C_xC_z = 8°$（音素为 6）

注：x、y 表示水平面域，z 表示高度面域。

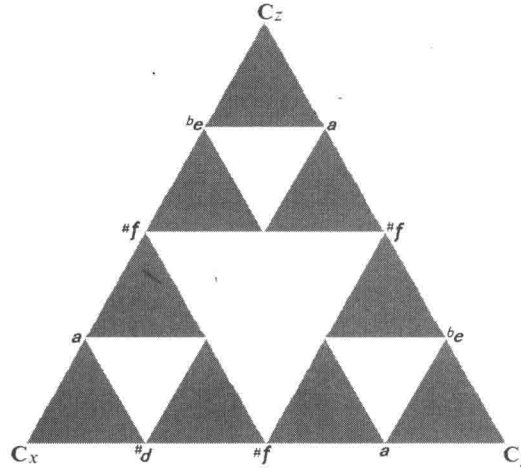
下面取各边长的中点，即增四（减五）的三全音点（音素为 3）把它们构成的三角形挖空，得下图：

例 187：八度等边三角形·边长分为两份·三全音量化面域



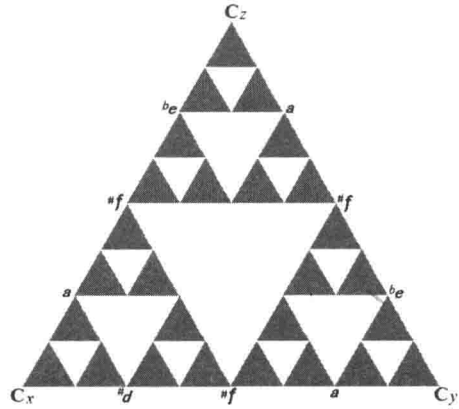
同理，再继续剩余三角形边长的一半，量化精度到增二（小三）度（音素为 $1\frac{1}{2}$）。

例 188：八度等边三角形·边长分为四份·小三度量化面域

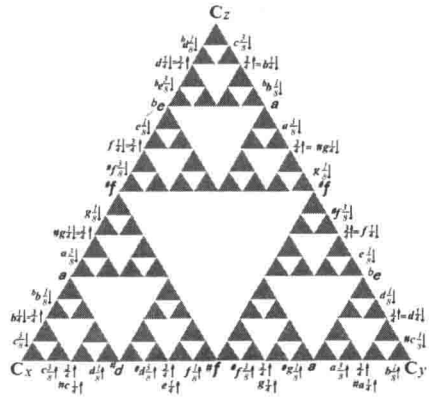


再取所得三角形边长的一半，量化精度到四分之三音（音素为 3/4）。

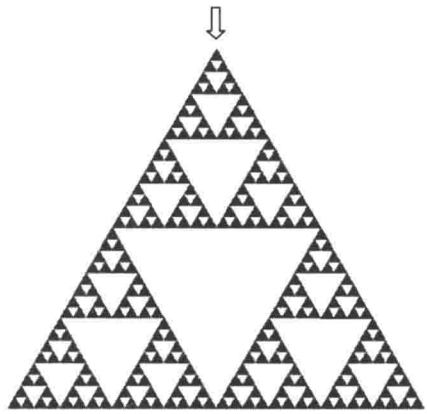
例 189：八度等边三角形・边长分为八份・四分之三度量化面域



例 190：八度等边三角形・边长分为十六份・八分之三度量化面域

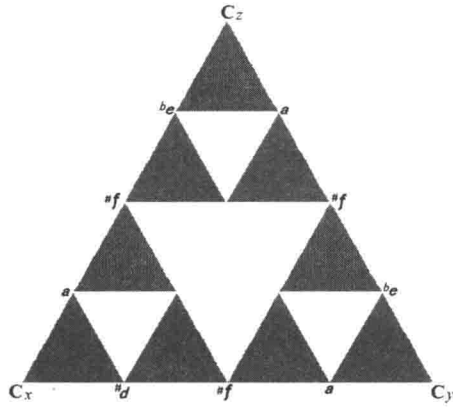


继续取更小的量化单位十六分之三，边长分为三十二份・还可以得到下列三角形。



这样的极限划分可以永远进行下去，从音乐实际演奏的角度到这一步就够用了。这一图形原理运用了谢尔宾斯基[13]“垫片”理论。上述三角形都是按照“找中点二分法”（类似传统乐理音值组合的基本划分）不断地向下进行。倘若是把边长按照奇数划分，如分为：三、五、七、九、十一……得到的三角形还会是等边三角形吗？

例 191：八度等边三角形·边长均分五份·一又五分之一音素量化面域

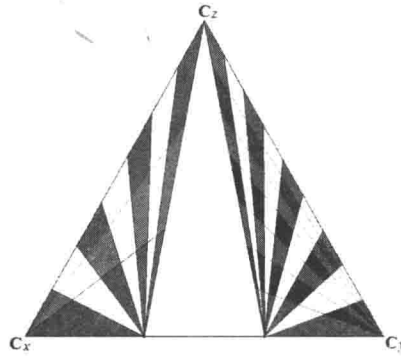


均分三、七、九、十一……结论一样，推理略。

可见得到的仍然是等边三角形，它就相当于基本乐理中音值组合法的特殊划分。

在此不禁要问，有无不等边三角形，倘若只有一个边长做任意数目的均分，从该边长外的第三维点（原三角形的高点）向各分段点连线，得到的三角形就是不等边三角形。

例 192：八度等边三角形·边长奇数划分得到不等边三角形量化面域



从上图各维出发得到的都是三角形，即便由维线相交得到的梯形及更加复杂的多边形，也可以继续划分都能找到更小单位的三角形组织。

从上述推理可以得到下列结论：

（1）音乐作品的自相似性在面域上[14]是通过三角形表现（即使在任意小的比例尺度内也包含整体）。

（2）任意三角形的三个顶点构成一个三和弦，四边形（梯形）可分为两个三角形，即传统七和弦可以拆分为两个三和弦。

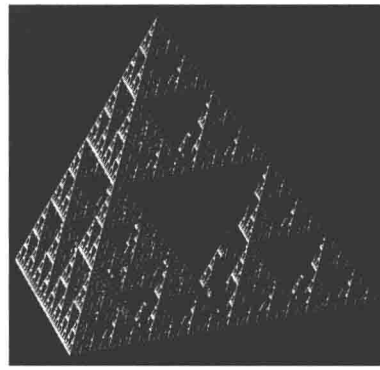
（3）N 面体最少包括 N 个三和弦，极限划分存在无穷个三和弦。

（4）音响的存现形式是立体的，具有时空属性。上述所有三角形的划分都是在“静态场景”（谱面意义）中的分形压缩。实际运用还需要考虑音响的多维属性。

（5）音乐就是三角形（三和弦）的集合[15]。

（6）阴阳、生死、分合、虚实体现分形构成的空间秩序和永恒法则。

例 193：四面体三角形谢尔宾斯基“垫片”量化体域

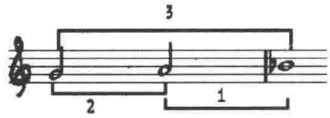


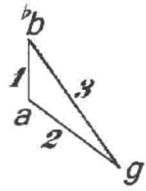
由此可见音乐音响分析的难度。

因为自相似性在任何时期、任何流派、任何作曲家的作品中都大量存在，仅仅是名词使用不同而已，无须赘述。下面仅以陈晓勇钢琴小品《日记 I》（*Diary* I）第一首《上发条的小鸡》（*Clockwork Chicken*）为例，从线域、面域、体域角度寻找作品的自相似性。

作品的核心材料来源于三个音。

例 194：陈晓勇钢琴小品《日记 I》第一首《上发条的小鸡》核心材料体现的自相似性



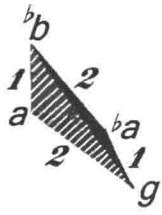


线域特征

注意：音素取整数

面域特征

整个作品是由“g—降 a—a—降 b”四个音构成的四面立体时空体域构成，见下图：



体域特征

四面分别是降 b—a—g、降 b—g—降 a、b—a—降 a、降 a—a—g，再由它们闭合成一个四面体。

通过乐谱可知作品可分为三个段落。

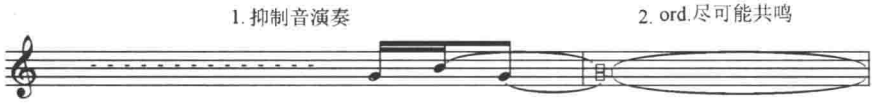
A. 呈示段

(1) 面域呈示：由“g—降 b—a”三角形构成，演奏音色使用两种方式。

①抑制音（dampened）奏法[16]，乐谱记为实音黑符头。

②余音（正常完全振动 ordinary）奏法[17]，乐谱记为方块符头。

例 195：陈晓勇《上发条的小鸡》呈示段核心材料面域呈述



原型呈示以后，紧接着逆行呈示。

(2) 体域呈示：由“g—降 b—降 a—a”四面体构成。

体域呈示以后又回“g—降 b—a”三角形构成的面域呈示。

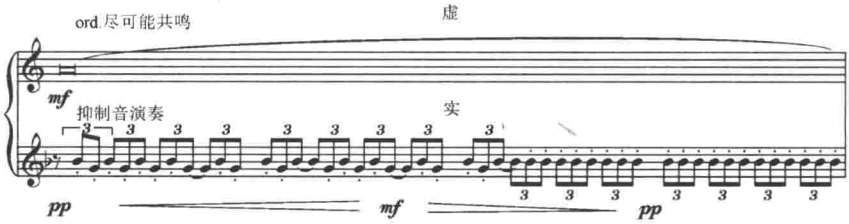
可见呈示段本身具有“再现性”。

B. 派生中段

如果说呈示段是演奏法的一维线性呈述，那么派生中段就是演奏法的二维对位。

即把呈示段的两种演奏法“化横为纵”形成“虚实相映”的对比复调二维呈述。

例 196：陈晓勇《上发条的小鸡》派生中段演奏法二维对比



本例上方声部持续的 a 音是一道看不见的风景，下方的“降 b—g”形成的循环断奏，由于抑制了琴弦振动，只发出基频音高，而几乎没有泛音。相反，由于 a 键琴弦共振而产生一系列谐波泛音，也就是说 a 弦成为了降 b—g 的共鸣箱，而降 b—g 两弦是发生器。

可见谱面的风景是实比虚好看。

实际音响画面却是虚比实精彩。

这从又一个侧面证明了作曲家喜欢的隐性原则。

中段不停用“a—降 a”两音来做虚轴共鸣，实音抑制演奏保持呈示段特点在另外两个（或三个）音点上轮回，整体始终保持面域（或体域）特征。

C. 总结性综合变化再现

再现对映呈示也具有三部性原理。

（1）面域再现：由“g—降 b—a”三角形构成，先回到演奏法（抑制音与余音）一线呈述方式。

（2）体域再现：演奏法虚实二维对位，虚用加法，增加为四个音。实用减法，先用“降 b—a”两音，再逐渐拉长稀释停到降 b 音上，收拢全曲。

上述分析可见三角形自相似性分析能够帮助我们从立体时空角度去把握作品的组织结构，把谱面静态场景的音高变成多维时空，立体的呈现出来，从而让我们发现许多传统分析无法触及的领域。

值得注意的是，自相似性分析所提炼的参数单位要相对统一。比如上述各例是从音高角度分析，还可以从音色、力度、时值、相位、密度……各参数分析。倘若混合参数，分析将更加繁杂。

自相似作为对称性的一种，是科学地或者哲学地把握世界的一种范式、工

具。它打破了整体与部分之间的隔膜，找到了部分过渡到整体的媒介和桥梁——整体与部分之间的相似，是古代哲学思想在近代自然科学中的重现：

一性圆通一切性，
一法遍含一切法。
一月普现一切月，
一切水月一月摄。
——玄觉《永嘉证道歌》[18]

这种在一刻钟把握永恒，“一沙见世界，一花窥天堂”的自相似性是艺术作品自我组织的根本原则。同时我们也要清醒地认识到分形理论不是万能的，它只是一种方法或规则。在事物整体之中还存在着惊异的混沌。

三、整体与部分的关系原则

自相似性研究的是事物（在此特指音乐作品创作）的秩序与过程，但是创作的结果（音响成品）却存在超然的无序和不可确定性。用格式塔心理学的观点来解读就是：整体不等于部分之和。不能将整体简单地割裂为各元素，整体有自身的特性，它不包含在任何元素之内。

格式塔学派强调从事物的整体来理解事物，一个事物的整体往往蕴含其所在部分不具备的特性，即整体大于部分之和。

比如人体有毛发、皮肉、五脏六腑、血脉筋骨……它们各自有自己的功能属性，但是，并不意味着只要这些元素具备就能完全体现一个活生生的人的功能。正如唐代著名诗人苏轼在《琴诗》中所言：若言琴上有琴声，放在匣中何不鸣？若言声在指头上，何不于君指上听？整体与部分是相互依存、制约、影响、转换的，切不可绝对，夸大地理解和执行任何一方的作用。“花在树则生，离枝则死；鸟在林则乐，离群则悲。”

部分映像整体，元素映像系统，这是分形论的哲学基础之一。

整体与部分不是一种线性关系，更是一种复杂的非线性关系，同样具有多维时空性。现实中既存在整体的功能大于各部分功能之和，又存在整体的功能小于各部分功能之和。

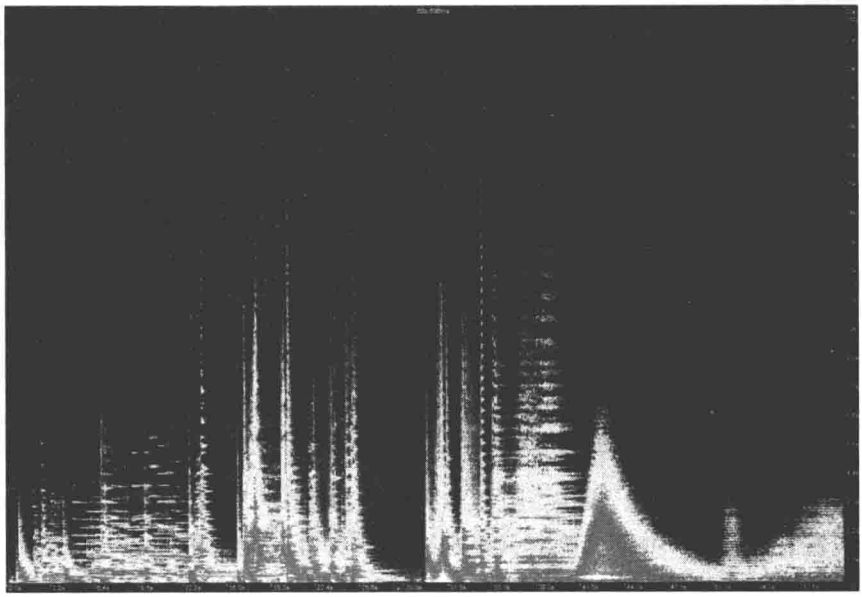
用陈晓勇的两个作品《四个小品·来自钢琴日记》（*Four Pieces For Piano from Diary*）与《六个小品·来自钢琴日记》（I、II/*Six pieces for piano*）（*from diary* I&II）来看，它们是大于钢琴小品集日记 I、日记 II、日记 III 呢，还是小于它们？毫无疑问，这两个独立作品具有各单独日记

不具有的功能属性。但是，仅从结构长度上看，绝对小于各自日记之和。

四、无序之中的有序原则

有序和无序是客观事物存在的一体两面，有序是指事物的规律性、稳定性、不变性、重复性，通过现象服从于规律表现；无序指事物不按照规则的要求运动，呈现无组织性、偶然随机性、混乱状态。音乐作品的音响呈现是哪一种性质呢？下面是陈晓勇管弦乐作品《梦的颜色》（*Colours of Dreams*）音频文件 2'50″—3'50″的频谱图。

例 197：陈晓勇管弦乐作品《梦的颜色》2'50″—3'50″频谱图



这张图体现的是有序还是无序？倘若说有序，何为它的序？如果说是无序，又是怎样造成的？仅从表面现象入手是很难回答上述问题的。作曲家自己力求的是“把无序变得有秩序，在听觉上找到一个主线，把看似无序的东西组织起来”[19]。如何组织呢？

上图的纵轴是频率，取值范围为 22—22,000Hz，横轴是时间轴，取样分析，把起点 2'50″归零，实时分析一分钟内的样品片段。

还有一个通过颜色变化表现的第三维振幅轴：

蓝色表示间谐波，绿色、黄色表示旁频，红色表示倍频。

随着颜色由冷色向暖色递进，振幅越来越强，反之，越来越弱。

从图可知，声音片段的前 42 秒是一个音响递增的过程，力度最强及最不协和处在 42 秒出现，但是，声场最丰富的谐波泛音却不是在此处，而是

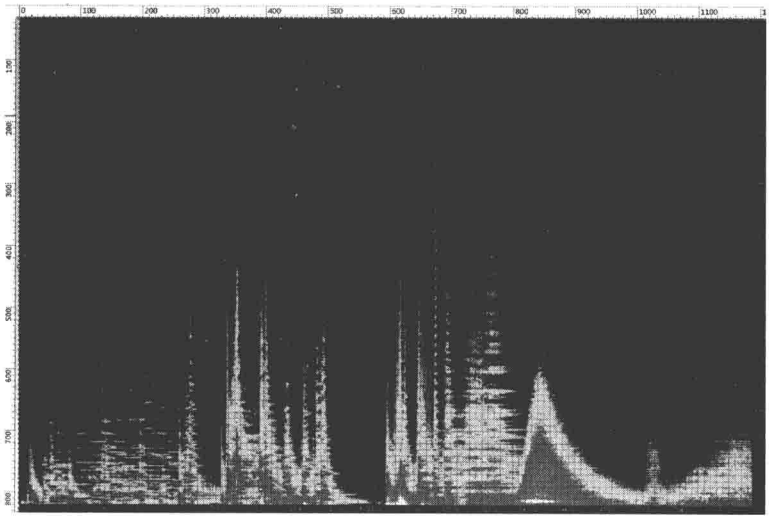
在它前面的 34 秒至 36 秒间达到（图中倍频、旁频、间谐波层次最分明，频带范围最宽处）。从频带宽度上看前面 36 秒也是在递增。可见作曲家在此的组织逻辑是：音响递增，这就是规律和有序。

42 秒后音响递减，而后再逐渐增长，同样表现出有序原则。

但图中的递增递减是线性化发展吗？不是！尤其是前 42 秒区间内存在许多相对共振峰及相对频域带宽，还有大量相互交错、缠绕的现象。它们很难找到绝对的规律，而呈现一种混乱、无序的状态。它们正好反映出有序与无序的依存性、包容性、制约性、转换性。宇宙中的任何事物都不存在绝对的无序，也不存在绝对的有序。事物外相的无序混沌往往内部存在着超然的有序。

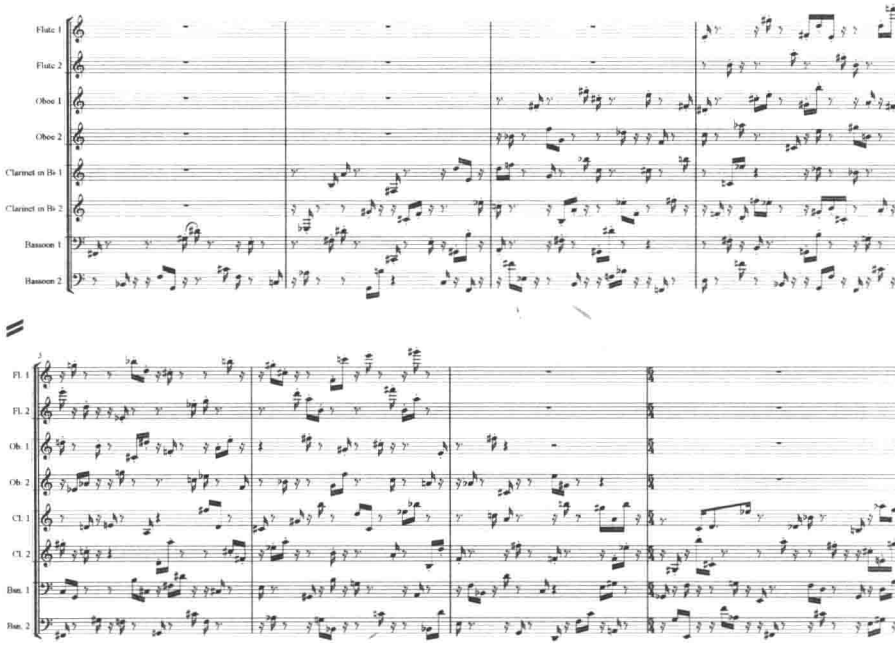
还以例 197 为对象，上面论证了它存在的无序现象，如果我们转换一个角度，从分形理论自相似性入手仍然能找到它超然的有序。下面应用图形学使用的分辨率概念，将例 197 打上网格标识线（类似于图像分辨率）。

例 198：把例 197 频谱图加上网格标识线



好像加了马赛克，可知拼图里面的每一个小方块越小，分辨率越高。而每一个小方块都可以再沿着对角线划分为更细的“三角形”。那么上述频谱图形就可以分割成 N 个三角形的集合，三角形又可以按照色差变化来分类，通过统计归类就能找到它们的自相似性。

例 199：陈晓勇《梦的颜色》总谱第 40—41 页木管组部分[20]



由谱例可见，整个木管组节奏时值的最小单位是十六分音符，表现出有序性。但是，每一个声部都使用大量不等时值的休止符来稀释旋律线条，加之，旋律中大量使用不协和音程音域大跳，打破了旋律节拍固有的规律，使得小节线形同虚设，八个声部形成纵横交织、音域交错、音色斑斓的无序、混沌旋律音响。技术处理上使用了：细节精致的有序，构成整体偶然无序。用陈晓勇自己的话说："音乐结构与梦幻很相似，常常能产生出意外的变化。这看起来不合逻辑，但是恰恰这种最佳状态的结合会产生一种梦想。"[21]也就是说："色彩和音乐越抽象，就越接近。"[22]有序是混沌复杂之源，混沌的内部存在着超然的有序。

五、简单与复杂的辩证统一

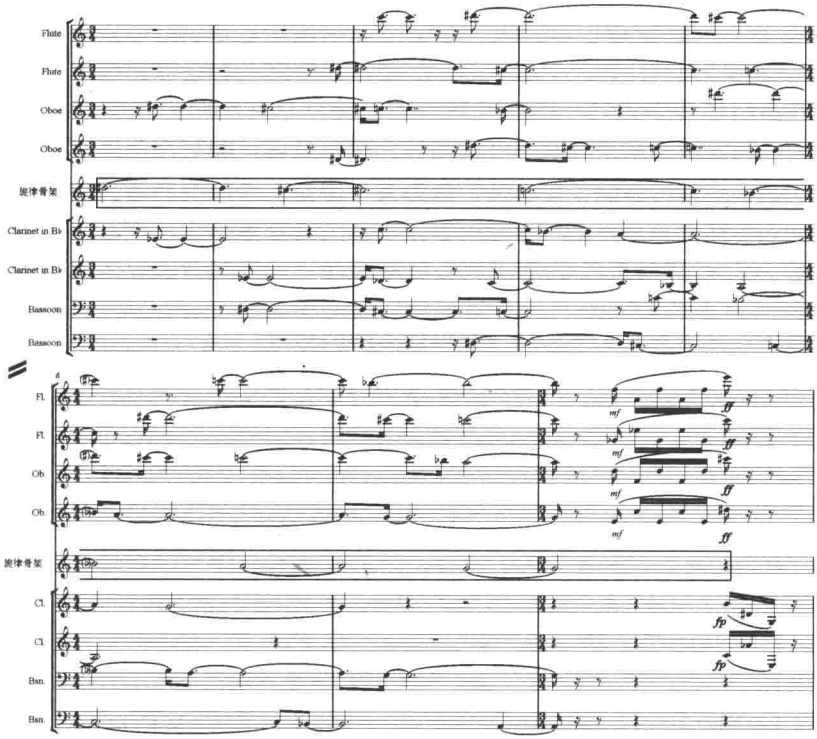
达·芬奇说："简单就是终极的复杂。"肖邦说："简单是最高的成就。"历史承载，气运推移，文质迭尚，不同时期，不同国度与民族的艺术家、哲学家、科学家异曲同工地追溯到事物组织的本源属性——简单性、自相似性、有序性，并以此为基础来认识复杂、混沌、无序、不可预测的客观世界。

简单不等于简约，不是对事物的简化、压缩，而是面对纷杂喧嚣世界保持的一种清醒。简单是一种态度、一种境界、一种处世的方法。

从简单入手，把对象分解量化到极限是一个高科技，永远都达不到终点的复杂过程；把简单的自相似性多维组合得到复杂的混沌。简单成就复杂，复杂包含简单。以此构成了两者的辩证统一关系。

就陈晓勇的创作而言，他始终追求“用有限的材料做最大限度的展开”[23]之探索与尝试，以便作品保持一种“形式上的简洁，而在声音运动的过程中饱含着无穷信息”[24]的可能。这与歇尔西的“单一音”、周文中的“自身衍变”、利盖蒂的“静态感”、尹依桑的“主要音”、频谱音乐强调的“一个音的世界”具有异曲同工之妙。在悄无声息中自觉、不自觉地传承了东方古典神秘主义哲学对客观自然感悟之意会、神韵，重大音希声、清微淡远，求意（艺）境、空灵、虚无，体师法承载，道法自然！

例 200：陈晓勇《梦的颜色》总谱第 14—15 页由直达与反射构成的复杂



上例旋律线条非常简单，就是一个六声音阶下行，参见旋律骨架声部[25]。

而后此旋律在木管的八个声部先后进入，使用不同的音区、不同的时差横向模仿，形成了类似于声场直达声与反射声的延时混响，为了增加音响的混沌程度，作曲家有意把每一件乐器陈述皆切割成不同音域交错超

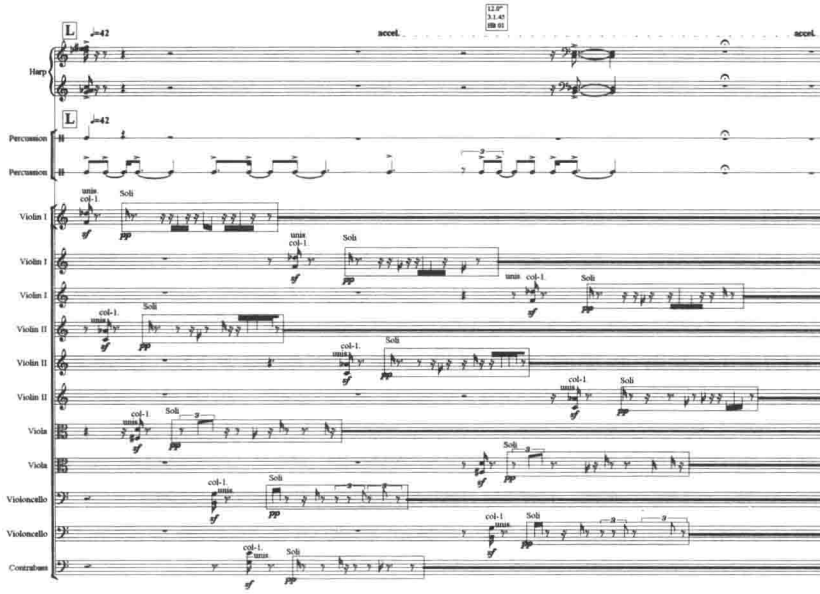
越，把原本简单的旋律线条“化横为纵，附加共鸣，影子和声”变为纵横缠绕交织的立体时空陈述。这成为作曲家织体组织由简单到复杂变化的常用技术手段。

六、确定性与随机性的统一

牛顿经典力学的局限性在于：宇宙中的万事万物都已经由物理定律规定了，一个细节也不会改变。过去、现在和未来都像已经写好的剧本，宇宙的发展只能严格地按照这个剧本进行，不允许加以任何的发挥。这种盲目的可预见性幻想把世界简化到失真的地步，现实的世界既不存在完全的确定性、可预测性，也不存在完全的随机性，而是确定性与随机性的统一。

所谓确定性是指事物存在的稳定性、守恒性、重复性、规律性，常常与简单、有序、自相似联系在一起。随机性往往与无序、不确定、无规律性、不稳定联系在一起。值得注意的是：确定性并不等于简单，随机性也不等于复杂。用混沌学理论已经证明的观点来看，确定的事物（或事物因素）内部存在大量内在的随机性，使得事物对初始条件存在敏锐的依存性、自相似性，而事物发展的结果具有不可预测性。也就是说，确定性里面也具有复杂性。如若把随机性等同于复杂性，就陷入了度量、维度的局限，相当于把复杂性等同于信息量的叠加。比如说用热力学来分析瓷器的内部粒子，它们具有复杂的随机性，但是，产生的结果就是陶瓷。很简单。因此，随机性也不等于复杂，复杂是介于确定性与随机性之间的状态。

例 201：陈晓勇《漂流的颜色》[28]总谱第 45 页



本谱例确定性表现在：

（1）固定的速度，乐曲按照每分钟 42 拍的固有速度序进。

（2）各声部精确量化的节奏及起步位置和音程。

（3）演奏法与力度的明确性、有序性安排。

随机性表现在：

（1）弦乐组除了起奏有固定音高要求以外，后续作曲家只提供节奏，没有规定音高要求，演奏家因人、因时、因地、因心情可以随意演奏音高，这是一种不受外界控制的内在随机性。它保证 N 次演出会绝对出现 N 次不同的音响，增强了乐曲的不可预测性。

（2）各声部在总的速率控制下，具有自我重复（方块里的音）次数自由处理的随机性，进而呈现出整体音响的复杂性、混沌性。

上述截取作曲家几部作品片段，取样分析提炼，以期找到作曲家的艺术观念、个性语言及理论体系的形成轨迹，这不是结论，仅是笔者学习心得。呈现于此的行文得益于作曲家给予笔者深交知己的礼遇，使笔者逐渐领悟到制约音乐发展的法则、规律更多来源于艺术之外的领域。从中笔者看到了：规律性与普世性、有序与无序、确定性与随机性、必然性与偶然性、简单与复杂的辩证统一关系。作曲家通过他的总谱及音响体现的不仅仅是技术与才华，更有对人性、思辨、哲理的不断探究，有对未知领域、声音奥秘锲而不舍的追溯和兴趣。他自觉自愿地借助自然科学，社会科学的最新成果，并联系自身履历经验加以有机结合，不断地完善自身的创作思想与体系，积小流成江河，积跬步至千里。成就了自身能在复杂混沌的当代世界里，踏出属于自己的艺术创作轨迹——“我一直在创作中，也在发展变化中。与中国同行不一样，在我的音乐中有着不同音乐的影响，这也是形成我音乐本身的变化以及再创造的重要因素”[②]……这是陈晓勇留给我们的最大启发和价值。

注释：

① 1979 年 12 月，洛伦兹在华盛顿的美国科学促进会的一次讲演中提出，一只蝴蝶在巴西扇动翅膀，有可能会在美国的得克萨斯引起一场龙卷风。他的演讲和结论给人们留下了极其深刻的印象。从此以后，所谓“蝴蝶效应”之说不胫而走，名声远扬了。

② 陈晓勇讲学时说，他去导师利盖蒂家上课，经常与导师以及一起上课的同学讨论混沌理论、非洲的节奏、音乐语言等问题。

③⑦ Sikorski 出版社拥有版权（1989），鸣谢 Repertoire Manager Gabriel Teschner

支持 Sikorski Musikverlage、Hamburg 授权刊登。

④ 引自陈晓勇 2013 年 5 月 23 日在首都师范大学音乐学院讲学内容。

⑤ 引自陈丹梅《在德国，有一个现象叫“陈晓勇”》，《光明日报》2008 年 10 月 24 日。

⑥ 频谱理论与实践早已经揭秘乐音的微分世界以及音质属性。

⑧ 注意：在此“音素”是以传统乐理计算，即 1/4 表示四分之一音，1/2 表示二分之一音，1 为全音。

⑨ 这里的“数”针对不同的对象有不同的表现，从音程而言表现为整数、分数；从声音频率、振幅而言表现为整数、小数；从三者的关系而言表现为对数、函数；从空间及声音相位而言表现为度数、正数、负数……

⑩ 引自罗塞夫《古代音乐美学》，莫斯科国家音乐出版社 1960 年版，第 16 页。

⑪ 所谓绝对的“点”结构，只起静止的谱面意义，一旦它触发振动就会有从生到死（发音到消失）的全过程，这一过程中存在许多谐波泛音，所以乐音中的“绝对单音”是不存在的。

⑫ 参见晏成佺、童忠良编著《基本乐理教程》，人民音乐出版社 2006 年版。

⑬ 谢尔宾斯基（W. Sierpinski，1882—1969），波兰数学家，在 1915 年提出垫片理论，是自相似集的一种，以对集合论、数论和拓扑学的出色贡献而闻名。

⑭ 音乐作品的自相似性在线域上是以音程度数（音素）表示，通常以作品最小音程数为单位。

⑮ 可能有人会反问，单一声部独奏，三角形在哪里？传统谱面记录的单旋律表面看是一维曲线，实际上是立体四维时空陈述，用频谱仪可以把每一个阶段参数记录下来。通俗地说就是：音响是以声场的传输转移来实现，谱面旋律的任何一个单音都构成以它为基音的谐波系列（声场），旋律音响是声场的有序集合。

⑯ 用左手摁住琴弦，抑制弦振动，尽量发出只有音头的干音。

⑰ 琴键触弦瞬间，左手立刻离开琴弦，让琴弦充分振动，发出所有谐波泛音。

⑱ 引自玄觉《永嘉玄觉禅师证道歌讲析》，四川巴蜀书社 2006 年 11 月 1 日版。

⑲ 引自陈晓勇 2013 年 5 月 23 日在首都师范大学音乐学院讲学内容。

⑳ Sikorski Musikverlage、Hamburg 授权刊登。

㉑㉒㉓㉔㉗ 引自陈晓勇 2013 年 5 月 23 在首都师范大学音乐学院讲学内容。

㉕ 本声部是笔者为了分析对比方便而添加的声部，原谱例没有。

㉖ Sikorski Musikverlage、Hamburg 授权刊登。

第十六章 由杨立青三部胡琴与乐队作品看其管弦化语言的变迁

曾经作为职业作曲家身份标志的交响曲体裁越来越不被现当代作曲家重视，其一是因为这种套曲的形式较难适应社会日新月异进步的步伐，现在的听众难有时间和耐心去聆听多乐章的交响曲陈述，体裁形式的故步自封需要自我更新完善。其二是现代音乐过度追求的形式自律论，把音响音色思维推到了至高无上的地位，形式本身就是内容，谁在写叙事、抒情、矛盾冲突的旋律主导作品，谁就代表僵化落后，就是老朽、反动。形不惊人，死不休的造型艺术，标新立异，发明创造层出不穷。不求经典唯一，无所谓思想、感情，但求技术的超越，形式的创新。当这种强调纯客观论的立场成为社会主流的艺术观念时，艺术创作、理论研究、历史研究、艺术批评等各个领域都以它为准绳和出发点，谁能不敬畏和忌惮，谁不怕成为历史的反面，谁愿意去代表落后？尽管这一主流观念在推行过程中同样也受到质疑、批判，抵制之声贯穿始终，但这些只能代表小众。而杨立青正是这小众中的一员。

论传统音乐文化功力，杨立青在他这一代的华人音乐家中属于佼佼者，世系家传，童子功夫，名师严格教导，学院耳濡目染，纯正的专业艺术技能教育为其日后成为音乐艺术大家奠定了坚实的基础。论现代音乐理论的系统研究学习，杨立青同样是“文革”后国内音乐群体中的先驱，1980—1983年作为国家奖学金的博士研究生求学德国。初涉现代音乐领域，他也曾彷徨茫然过，传统音乐技能、习惯的创作思维与现代音乐创作观念矛盾冲突，他首先需要“擦除自我，洗心革面”潜心研读，而后才悟出了“在音乐上务去陈言，力求新鲜感、个性化”[①]向西方求答案。这期间他创作了唯一一部愿意称为“交响曲”的博士毕业作品——大型管弦乐《忆》（又名室内交响曲）。在此以前及以后的所有创作中，有各种体裁的交响乐[②]、室内乐、声乐、合唱及电影、舞剧音乐形式的涉猎，但他没有再创作纯粹的交响曲，这也是有别于郭祖荣（19部交响曲）、朱践耳（10部交响曲）、王西林（4部交响曲）、钟信明（2部交响曲），在承前启后一代作曲家群体中的一大特色。此后的作曲家群体就更少涉足这一体裁。

另外，杨先生创作的作品几乎完全公演，唯独这部室内交响曲《忆》，

从未演出过。以他的地位、学识、资源、国际交流时机，公演这部作品的天时地利与人和一直存在，为何始终不能变成音响呈现呢？我更愿意理解为：先生本人对此作不甚满意，尽管它不乏创新立意，在“复合节奏、交替节拍、泛调性、人工调式、多调重叠、单一音调（简约主义风格）、和声紧张度的控制、十二音序列写作、新音色新音响的挖掘等方面作了一系列大胆的尝试”[③]。但实验研修的成分太多，与先生一生立足追求的“现代中国之声”有出入，以至于他的德国导师 A. 科尔本（Alfred Koerppen）这样评价“你的作品如果说是巴伐利亚哪位作曲家写的我也相信，风格很地道”[④]，这里有对来自中国的学生已经熟练掌握现代音乐作曲技法的由衷肯定和鼓励，也有字里行间没有说，而作为学生的杨立青能够感悟到的善意希望：作品唯一性、前沿性及作曲家个性的统一，广义民族性与时代性的融合方面尚存差距。

如何在这些领域突破，探索一条适合于中国音乐的现代之路成为杨立青先生回国以后的主要任务，他以身作则，亲力亲为，教学、传播、创作、交流贯穿着他繁忙的一生。这其中为胡琴与管弦乐队创作的《悲歌》（为二胡与乐队，1991）、《天山牧羊女》（为二胡与交响乐队，1996）、《引子、吟腔与快板》（为二胡与乐队，1998）、《洪湖主题随想曲》（为二胡与乐队，1998 年配器）、《荒漠暮色》（为中胡与交响乐队，1998）一组同一体裁系列作品，前后贯穿近十年，折射出作曲家对这一体裁的偏爱，从中也寄托、记录有作曲家管弦乐语言的变化历程，以下择取作曲家公开发表的其中三部作品为线索，研究作曲家在这一领域的创作思维和技术使用习惯，并从中总结归纳出其具个性的“现代中国交响之声”的探索与积淀，寻求作曲家个性化的语言特点。

一、体裁的选择

我们知道无论是作为协奏曲创作，还是把独奏乐器仅仅作为一种音色与管弦乐队融合、抗衡、对比、协调，民族乐器与西洋管弦乐队调色的难度要远远大于西洋乐器自身协奏的难度。也就是说，琵琶、二胡、古筝、竹笛等民乐协奏曲的创作难度要远远大于小提琴、钢琴、单簧管、长笛协奏曲的写作难度。前者天然包含两种文化、艺术基因的碰撞，更难处理的技术层面是东西方乐器律制不同，音程距离，协和程度，定弦开孔方式都不同，本质上说就是：各自的声音频谱属性不同，造成东西方乐器天然地分离，越听越不如调，稍有不慎就会满盘皆输，融合成为一种畏途。既然会面对如此多的困难，杨立青先生为什么还如此钟情于民族乐器与西洋管

弦乐协奏、合作的探索呢？困难与希望同在，机遇与挑战并存。首先，民族乐器自身就代表着东方文化，中国特点，其音色标识的唯一性、排他性天然独立，为探索作品音响的创新性创作了条件。其次，听众的承受力、欣赏水平及猎奇心理都希望更不协和的音响出现，艺术创作也从具象发展到意象再到抽象，创作及欣赏双向的发展为东西方乐器的直接碰撞创造了心理、社会发展、艺术需求的成熟条件。杨先生从1986年交响叙事诗《乌江恨》（琵琶与交响乐队）开始进行的民族乐器交响化的体裁探索，持续耕耘十二年，结出累累硕果，其中尤以《荒漠暮色》为代表的作品，技艺之娴熟老到，境界之高雅格调皆达到了前所未有的高度，使其成为该体裁系列作品中最具社会和艺术影响之典范。

二、走出传统

艺术家创作的基础来源于传统，创新也是建立在传统之上。但并不意味着我们可以坐在老祖宗留下的五千年灿烂文明成就上“自豪到永远”。尊重传统文化，并不是不加选择地天天顶礼膜拜。中华文化如果真正五千年一成不变，不思进取，我们今天就只有甲骨文、青铜器了！中国文化传承五千年血脉不断的真正原因正是它的包容、革新、进取、自我蜕变所爆发出来的生生不息的生命力。对于音乐领域而言，传统的单线（旋律）思维，章回聚散，使我们至今没有凝练出具有中国特色的和声学、曲式学、复调学、配器学成果。载入史册的主要音乐流派（古典、浪漫、印象、现代、后现代……）也都是缘起西方。尽管已经有人发出了“建立中华乐派”的呐喊，但也仅仅是呐喊而已。一个流派不可能建立在口号上，而是需要大量为世人认可的作品作为积淀，并且能从这些作品中总结抽象出具有历史传承，时代特征，独立思想，审美趣味，艺术主张，创作方法和表现风格的理论成果，才能称之为流（乐）派。最切实际的做法就是实干！

杨立青就是实干家。他知己之不足，师夷之长技，继承古今、中西的文化艺术精粹，探索创新“现代中国之声”。管弦乐《悲歌》（为二胡与乐队，1991年）以作品的形式记录了其走出传统、革新锐变的历程。

《悲歌》以二胡名曲《江河水》为素材，原曲的独奏版本流传绝伦，影响巨大。作曲家面临的首要问题是如何突破？倘若仅仅是配置一部管弦乐版《江河水》，作曲家肯定不会把乐曲易名。倘若仅仅从《江河水》里面提炼核心动机，音高素材，且把二胡作为管弦乐的音色染色，又有破坏《江河水》的原有境界格调的危险。作曲家选择了一条中间路线：在传统与现代之间交汇，走出传统，走向现代！

1. 找到二胡与管弦乐队音响方式的同一性

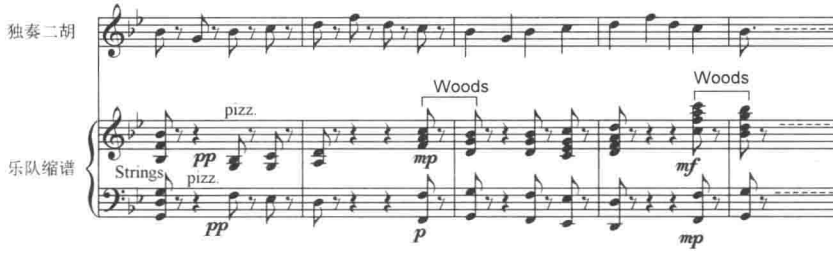
前面说了二胡与管弦乐队存在天然对立关系，异质音色，文化对比，律制差异所具有的冲突、对抗和矛盾很适合于协奏曲体裁要求，作曲家正是借助西方协奏曲之体来解构《江河水》之板式。然而对抗、竞技、联想只能为协奏曲提供一个方面的造型，更何况中国音乐不是以炫技见长，典型的纯西方协奏曲模式是不能直接套用的，扬我韵律之长避我炫技之短，为我所用，是作曲家选用的有效途径。另外，协奏曲还具有协同、合作、统一的要求，作为异质音色的独奏乐器与乐队，还有《江河水》的曲体板式中有哪些地方可以提供这些要求呢？找到这个问题解决之道成为作品成败的关键所在！

从纯技术的角度上说，异质音色的融合，取决于把各自乐器的个性降低到最低限度，同时降低音色对比度。如何才能够达到理想效果呢？从声音频谱的时间过渡性出发，当声音包络只有起奏（Attack），而没有出现衰减、保持、释音阶段时，音色状态最接近，融合度最好。换句话说，针对弦乐器二胡而言，拨奏，或者是不揉弦的顿弓（奏），不揉弦的单音断弓所发出的音响与西洋管弦乐最融合。《江河水》乐曲本身提供有这种音响吗？

例 202：二胡独奏曲《江河水》第一部分慢板尾部断奏　摘自黄海怀移植谱

杨立青先生正好利用了这一段断奏，把它作为独奏二胡与管弦乐队趋同的桥梁在乐曲中先后运用了四次，参见例 203 至例 205。

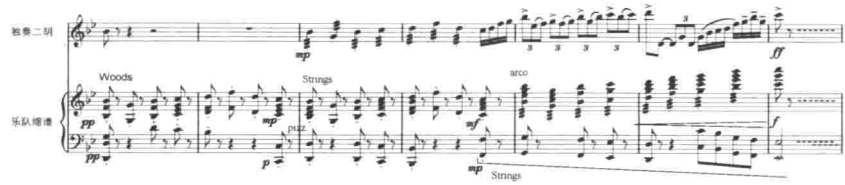
例 203：杨立青《悲歌》第 62—65 小节缩谱



作曲家把节奏扩展了一倍（实际上全曲的记谱时值较黄海怀的移植谱都扩展了一倍），乐队此时以弦乐组拨奏的形式，点状支持独奏二胡，由于都是弦乐器，而且只有音头，几乎没有延时，整体音响天衣无缝地融合在一起，木管仅仅是局部点状（在此，更应该看成是音色提前预留），第二次进

入还做了音域扩展作用。乐曲第二次运用该材料出现在第 91—96 小节。

例 204：杨立青《悲歌》第 91—96 小节缩谱

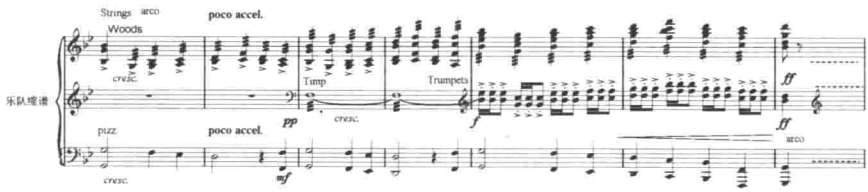


对照例 203，音域先收再扩，主奏旋律先移植在木管组由 2 只双簧管、2 只单簧管及 1 只低音单簧管叠置和交置排列断奏呈述，93—96 小节木管增长加入长笛、大管做音域扩展，高点 96 小节再加入短笛。与此相应，93 小节侵入小提琴 II 及中提琴拨奏，同度覆盖；而后整个弦乐组进入改用拉奏，中高音区运用颤弓，与低音反向扩张推向高潮。不难看出，整个过程是一个增长阶段。

乐曲第三次运用在第 206—209 小节，作用与音色配置基本与例 203 相同，谱例略。

乐曲第四次运用在第 219—224 小节，把独奏二胡抽离掉，使音响成为一次完全彻底的乐队增长阶段。

例 205：杨立青《悲歌》第 219—224 小节缩谱



首先以弦乐与木管混合音色进入，而后逐渐加入打击乐及小号、大号形成乐队全奏。此处除了担任趋同增长功能外，在曲式结构上还起到过渡连接的作用。

上方所有谱例反映出的信息与传统毫无二样，凭什么说杨先生走出传统呢？走出传统依靠的恰恰是传统的功力，可谓收得越深，击发越有劲！这里追求的同一性是一根纽带，是音响最佳融合的交汇点，它就好比“风筝的线”，无论东西南北如何漂移（创作思绪如何天马行空），只要一拽线就能“锁题趋同”，这是使作品收放自如的技术保证。至于走出传统，主要是由作曲家个性化的创新立意来解决。

2. 具有个性话的创新立意

对于《江河水》的解构，一千位作曲家会出现一千种方式。杨立青的

方法是：守住《江河水》的固有立意、特征外，从两级反向拓展情绪，悲到极致加入华彩哭腔，虚拟幻想到逍遥梦境（对比中段）。这两种原曲没有的境界升华，属于作曲家的神来之笔。另外插入浓墨重彩的乐队引子、呈示与展开以及扩大再现和尾声的处理，从曲体结构上繁化、拓展了原曲《江河水》的“散—慢—行—慢”的板腔结构。同时，又保持了这一结构特征。这些夹叙夹议夹联想的插入对比，丝毫没有突兀、不畅，而是极度自然，天衣无缝地融在一起。这不可不说是作曲家的老到！创新而不惟新，个性又有节制！参见例 206。

例 206：黄海怀版《江河水》与杨立青《悲歌》板式曲体对比图

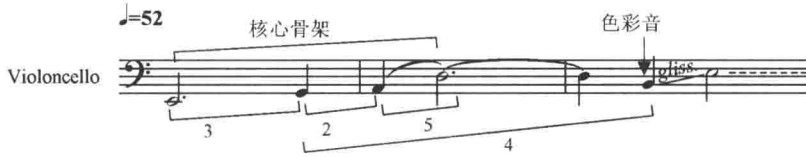
原曲板式	散板	慢板			行板		慢板		
	bB				C		bB		
悲歌曲式	乐队引子	二胡引子	乐队呈示	二胡呈示	乐队展开	对比中段	华彩乐段	扩大展现	尾声
	17	10	8	35	9+24+10	16+11+24	23	42	16
	C—bB				G—C		bB		
			呈示部		混合展开部		变化再现部		

从上表对比可见作曲家从曲体结构上加入了六成创新，四成守住原体。

那么创新的语汇为什么没有与原体产生“两张皮”的分离感呢？同源、同胚、同基因使得独奏二胡与管弦乐队保持了高度的自相似性。

同源、同胚、同基因表现在音高组织的五声骨架性，虽然也加入偏音及综合调式等手法，但五声骨架始终没有动摇，此特征在横向旋律线条的组织上表现得最为显著。《江河水》的五声特征已经无须证明了，下面截取作曲家衍伸结构的几个片段。

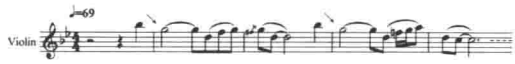
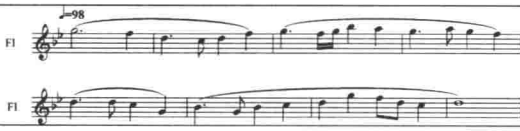
例 207：杨立青《悲歌》衍伸结构横向旋律特征·引子部分



注：其中数字表示音级数，1 为小二度，2 为大二度，3 为小三度，4 为大三度，5 为纯四度，6 为增四度。

最大的特点是用偏音“变宫”代替了“宫”音，使独奏二胡的“正宫五声”得到“偏移装饰”，这里的滑奏是最具中华特征的“本源韵律”装饰！

例 208：杨立青《悲歌》衍伸结构横向旋律特征对比图

旋律位置功能	谱例	特征
乐队呈示 27—31 小节		清乐六声音阶 羽调式
导入展开连接 71—78 小节		清乐缺清角 六声音阶角调式
对比中段 114—118 小节		雅乐 徵调式
华彩 175—179 小节		雅乐调内调式 交替

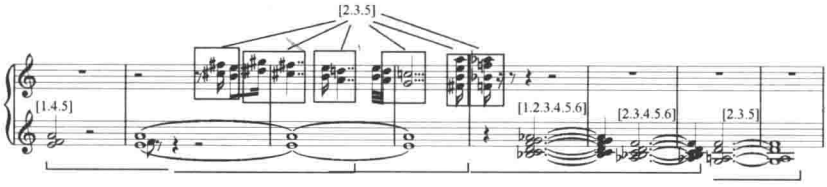
注意：表中谱例受空间所限是局部截取，调式特征指整个功能段的整体特征。

从谱例可见，横向线条的自相似性保证了旋律的亲缘关系，进而从叙事进展的时间过渡方面保证了作品的统一。

3. 纵向突破

横向方面的守题、亲缘，带来的结果难免保守。这表明习惯于感性和直白的中国艺术家要试图摆脱传统的桎梏需要面对何其艰难的途径！只有找到与传统抗争的手段，才能给作品音响赋予时代的要求。拓展纵向深度，追求理性是一个有效的方法。

例 209：杨立青《悲歌》乐队引子纵向和声特征



与例 6 对比会发现，核心音程正是［2、3、5］，把例 207“化横为纵”，并加入音级数为［1］或［6］的音程来强化和弦的不协和性，以上反映出作曲家的纵向布局是具有严密的逻辑性。表现在：

（1）纵向和声的不协和性按照“先递增，再递减”的方式进行。

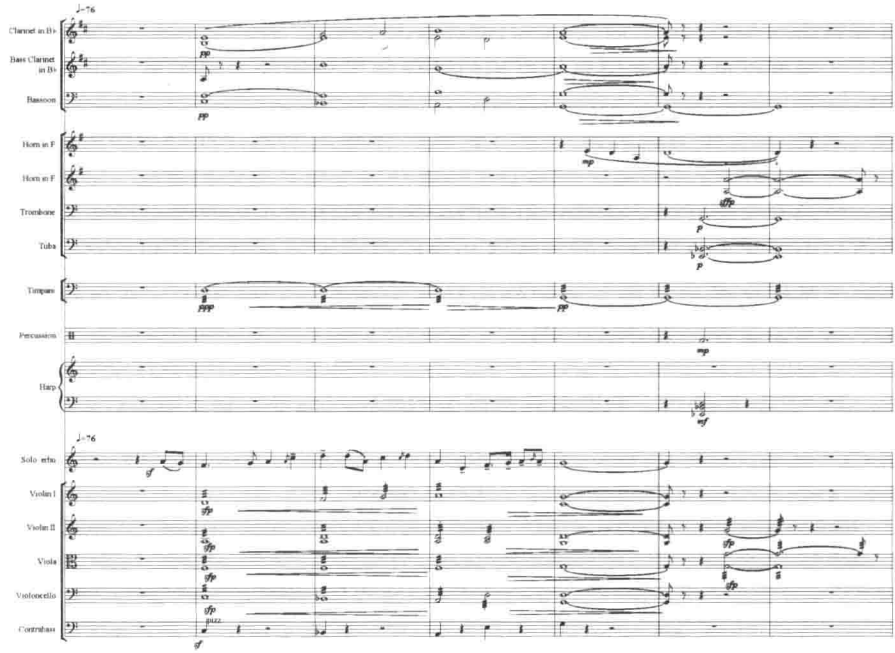
（2）和弦音程组合强调四度、二度，不排斥三度。

（3）纵向构成的调式色彩是按照“嵌入式”的方式进行。在渗透中逐渐变化色彩，没有使用突置方式，以此强化了色彩变化的连续性、化合性。

正是因为这些严密的理性思维，最终保证了整体音响达到情理之中意料之外的效果。这里的引子作用为全曲提供了材料、逻辑思维方式、音响变异手段的先期预留和暗示。

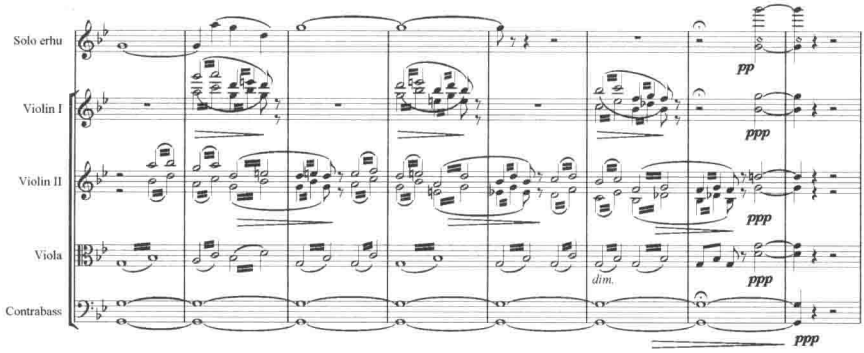
作品中除了运用独立结构功能、色彩意义的纵横组织以外，还有把交响乐队作为独奏二胡的共鸣箱、延时器的处理，把独奏与乐队处理成“身与影”的关系，就像二胡音响游走在时空的任意角度，拖拉出浓淡深浅、厚薄高低各相宜的音响造型。这是极具东方特点的清微淡远、空灵神韵。需要说明的是作品中大量使用的模仿、对比复调、呼应式填充、音型化对位等手段是业界早已经成熟的技术手段，本书不作为研究对象。在此，反而把一些不经意的小片段拿出来研究是因为它们具有现代声学成果付诸创作实践的意义。

例 210：杨立青《悲歌》导入华彩第 157－162 小节织体设计



乐队的织体就像是独奏二胡牵引的声场一样，环体而行，气韵生动，附加共鸣！二胡收音以后的身影，余韵由乐队复合音色延续，音响造型富有特色。

例 211：杨立青《悲歌》尾声第 238—244 小节弦乐织体



整个音响布局是以 G 为基音的谐波倍频泛音频率扫描的声场呈现。织体外形也如频谱图的时间过渡（ADSR 包络）一样，高频泛音最后出现，最先消失，低频持续贯穿，织体肌理呈现声音频谱谱线特征。

三、走向民间

1998 年是杨立青先生创作丰收的一年，《引子、吟腔与快板》（为二胡与乐队，1998）、《洪湖主题随想曲》（为二胡与乐队，1998 年配器）、《荒漠暮色》（为中胡与交响乐队，1998）都在这一年中完成，从个人语汇的探索及技术创新角度看，这些作品有进有退。以此更能反映出作曲家作为一位社会公民，尤其还是一位具有行政职务的院长、先生，还有为人子，为人夫，为人父的家庭职责……迫使他不得不迂回向前。世界上应该不存在任何一位艺术家的创作轨迹是没有迂回，直线上升的。这也不符合艺术发展的规律，个体也不可能完全不受外界影响，不食人间烟火。《引子、吟腔与快板》就是迂回，重新走向民间的产物。

这部作品纯粹从技术层面考量，相对于 1991 年的《悲歌》而言应该说是趋于保守！作品除了引子嫁接了一段京剧快板导入外，其余部分基本遵循张式业[5] 1982 年版二胡独奏曲《一枝花》的曲体结构，作品是对其的管弦乐编配。这与技术无关，而是对于特定内容的特定选择。作曲家放弃了《悲歌》中采用的夹议夹叙夹联想的手法，隐匿自身的主体感受，最大限度地尊重了原曲的意境与造型。这首源自山东的民间乐曲有很强的地域特征，其旋律的高亢嘹亮，悲壮激越，早已为人们所熟知和喜爱。面对这样的人间精品，尊重、还原是最好的选择，任何人为的雕琢都会破坏它自然天成的魅力和价值。为此，作曲家再次选择走向民间汲取养分积淀力量。如果说《悲歌》显现作曲家入乎其内的功力，那么《引子、吟腔与快板》就体现了他出乎其外的技术。这种既能入里，又能跳出的功力，得益于作曲家长期深入生活，又要高出生活的创作要求。

四、走出现代

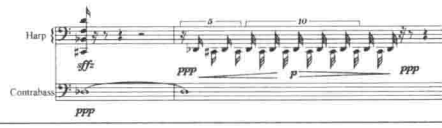
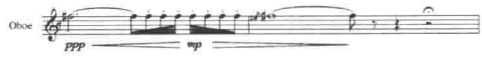
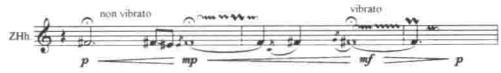
有了前期的储备，作曲家同年创作了一部堪称经典的作品《荒漠暮色》，这部以“丝绸之路的回响”为委约主题，具有国际化视野，兼顾思想性、智慧性、时代性与个性平衡的作品自 1998 年 10 月由叶咏诗指挥香港交响乐团于“17 届亚洲艺术节”首演之日以来，持续引起国内外业界高度的关注与好评，并且荣获 2004 年“第十届全国音乐作品（交响乐）比赛一等奖”。如果说前叙作品还是限于具象和意象的创作，作品音响还能顾及广泛的受众理解和喜爱的话，本部作品就更加抽象，不再受旋律思维的约束，而采用音色音响化思维，运用点、线、面、场、组合的音响造型来表达自己主观世界对“丝绸之路”的感受。这是一种更加纯粹、文人化的“中国之声”，作曲家几乎在音乐组织的各个方面都有自我超越。

作为一部追求现代性的音响音色作品，它一定需要建立在现代声学基础上，广泛吸收来自科学、人文、艺术领域的最新成果，使作品成为时代性、前沿性、原创性的代表。下面就作品的组织元素、织体形态进行取样分析。

1. 点的呈示

无论什么流派的音乐作品，它必定具有最简化的初始细胞。现代音乐观念认为：单音及单音的重复即具有生命意义的自相似性。

例 212：杨立青《荒漠暮色》引子中的三次点呈示[6]

点呈示位置	谱例	特征
乐队呈示 1—2 小节	1. 	以^{b}D 为基音的单音呈示，通过力度与密度改变音色
散板双簧呈示 10 — 11 小节	2. 	以 ♯F 为基音的单音呈示，侵入小二度倚音程
独奏中胡呈示 11 — 12 小节	3. 	骨架同上，继续侵入三全及上方小二倚音程
中胡提供的原始音程集合	4.	音级为 1、2、5、6

这种单音陈述方式在第六章《频谱音乐的旋律形态》中归纳为“不等时直线型旋律”，即为点的呈示。

表中第一个谱例为作品开始处建立在以降D为基音的声场呈现，竖琴开始的柱式和弦事实上是降D声场产生的泛音列，在此，作为起奏阶段的点状支持作用。紧接着以双弦同度（降D与升C）从密度和力度上相向递增递减染色低音贝司持续的骨架基音，使音响音色在“静止中形成颗粒的流动性”。这是现代音乐“静默旋律”的典型方式，也是最节俭材料的方式。

第二个谱例在同音持续中加入下方小二度倚音装饰，在不经意之间插入一个核心音程。

第三个谱例继续在升F基音上持续，仍旧以倚音方式输入三全音及上方小二度核心音程。自此，材料呈现了小二度、大二度、三全音、纯四度（纯五度）组成的原始集合，音级数分别为1、2、5、6。小二度是作为旁频干涉作用附体在倍频音两旁（升E、G附体在升F两边），增强倍频的不协和性，形成声场中的身影关系！参见表中第四谱例。

为什么作曲家要以音级数为1、2、5、6的集合作为整个作品的原始材料呢？为什么不包含音级数为3、4（小三、大三度）的音程在材料中呢？这是两个原因所致。

其一：作曲家创作这部作品的原始素材是从古琴曲《梅花三弄》提炼的，do－sot－sot……纯五度是它的核心音程，但是太协和了，为了增强它的不协和性，在保证五度的基础上加入旁频小二度装饰，于是三全音、小二度这些不协和性高的音程出现了。倘若从倍频音向旁频滑奏，无论上下移动都能模仿古琴演奏的韵律，用吟、绰、注、揉等不同的奏法，去追求散、按、泛、远等不同的音色效果。

其二：原始集合没有音级数为3、4的音程，并不是说作品禁止使用小三、大三度音程，原曲《梅花三弄》就已经提供了这些音程。作曲家的目的是想在横向旋律线条中延迟出现这些音程，拉长“点—线”的发展过程。事实上，在作品第一小节开始的第一个柱式和弦中就已经包含了“所有音程”[7]。作曲家自己设计了九声人工音阶作为控制作品的原型音列。

例213：杨立青《荒漠暮色》原型音列九声人工音阶

上述音列里面已经提供了全部音级含量。

2. 线的稀释

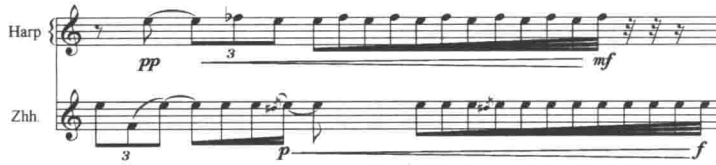
传统作品的线性写作是以完整的旋律线来呈现，现代音乐需要尽量避免连成旋律的线出现，所以稀释、阻断、分解是很好的选择，以便把线条切割成不同作用的结构动机。

例 214：杨立青《荒漠暮色》中胡主题呈现的结构动机　摘自总谱第 13—18 小节

序号	动机谱例	特征
动机 a	p	跳进为主
动机 b	Sub. p	同音直线，节奏顺分
动机 c	mp cresc.	以级进为主
动机 e	p f	包含级进与跳进的三音自由重复，节奏先顺分后逆分再等分。

以上四种动机型不仅仅作为独奏中胡的线性发展准绳，而且还控制、凝结整部作品的线性发展。四个动机本身也具有阻断性，进而避免了长气息旋律的成型。作为追求模糊性，点彩化的音响音色现代作品，是需要避免太清晰的旋律线条出现的，在技术上如何实现模糊化，涂鸦、变形呢？在作品中，作曲家还有效运用了下列手段。

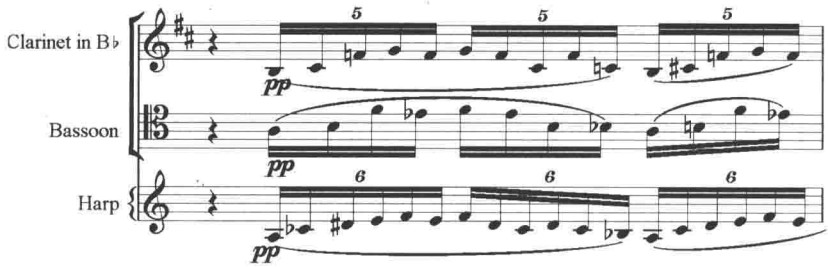
例 215：杨立青《荒漠暮色》中拍音形线条干涉作用　摘自总谱第 83 小节



竖琴与中胡都在演奏相同的音，但是由于它们节奏错位，音高也不可能绝对一样，音色又不同，因而它们之间会产生“拍音干涉”，进而模糊了各自的个性，达到一种化合染色的效果。这是采用纯粹横向手法来模糊

线条的手段。

例 216：杨立青《荒漠暮色》中锯齿型线条干涉作用 摘自总谱第 22 小节

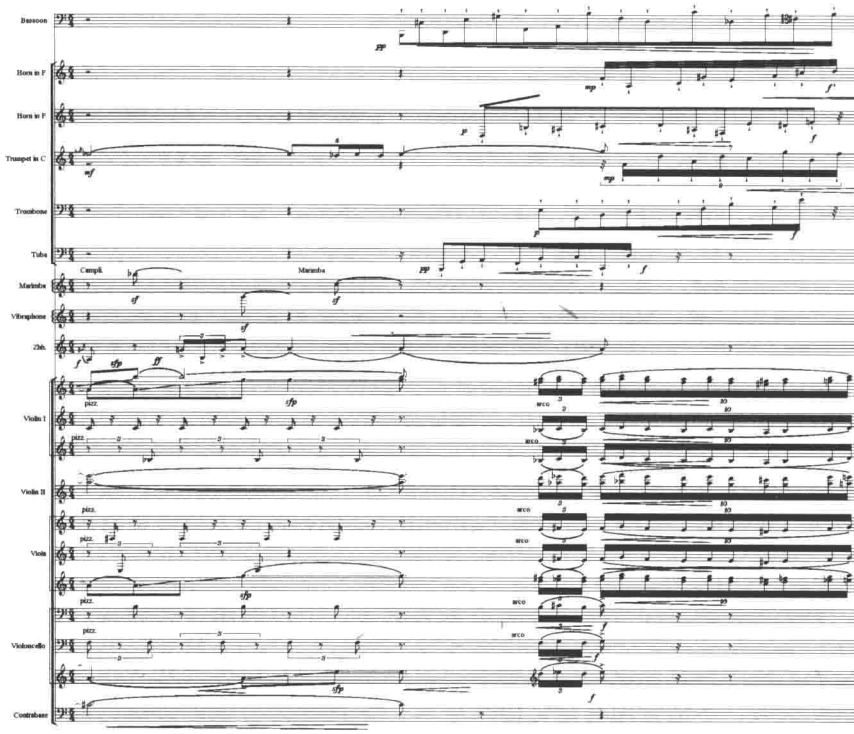


各声部演奏一个锯齿化的固定音型，单位拍节奏按照 4∶5∶6 的发音点数纵横组织，各声部是同非同，模糊干涉。这种手法在作品中使用最多，从音质划分可有同质音色组合，异质音色组合；从线条外形可以分为增益型、衰减型、曲线型、带状、合纵等手法运用，受篇幅所限不再载录谱例。

3. 节奏的突破

节奏是音响时间过渡呈现的最重要因素，中国戏曲音乐领域存在丰富的，至今还未能有效总结的节奏组合方式。然而，记谱却非常困难！因为自由度太大，不适合用有量记谱来呈现。一旦变为有量记谱就已经面目全非了。倘若无小节线自由散板记谱，习惯于西洋乐的演奏员与指挥都会一脸茫然，无从下手。这一直都困惑着中外音乐艺术的深层次交流。现在的音乐教育对中国传统音乐知识，尤其是对戏曲、琴曲知识的严重缺失，使得如今培养不出古今中外融会贯通的通才，进而也无法解决这一问题。意识到的也只能心有余而力不足，呐喊，呼吁，引起重视。没有意识的要不就回到过于简化的表象的传统，要不朝圣西方现代，困惑在过于复杂的节奏计算模式之中，难于自拔。当然，这里不包含完全没有发现此类问题的那些人，就让他们继续知足在小节线约束的梦里，自我陶醉！这是一个始终困惑着所有中国有良知、有担当、有创新的当代作曲家最严重的领域，至今，也少有良方，突破有限。陈其钢初到法国时，梅西安评价他的作品不足就有“①节奏没有变化，②结构很传统……”并认为“节奏和曲式（构成方式）是很明显的构成时代特征的东西，要到法国来学习就一定要学这些东西”[8]。欧美对于节奏的组织方面的理论研究及其实践成果是急需我们中国作曲家借鉴的。例 216 中单位发音数按照 4∶5∶6 的组合节奏，就是有限模糊的有效手段。但是它还没有冲破小节线的束缚，还在强调节拍强音（起奏）的一致性。

例 217：杨立青《荒漠暮色》节奏取样　摘自总谱第 57 小节



本例相对于例 216 在节奏组织上已有本质上的突破，小节内的前一半仍旧是 1∶2∶3∶4∶6 的数列组合，不同于例 216 在于作曲家把发音点稀释了，尽量力求在同一个点位只有一个声部的一种音色在发音，子节奏层的细分，保证了整体音响的点彩性。后一半的节奏型可以分为两类，一类是特殊划分的绝对量化节奏（三连音、九连音、十连音）及基本节奏；另一类是自由组合的流体节奏（ ）。两类节奏都细分为不同音组的子节奏层，各自按照不同的时间点进入与退出，前后共同作用使得小节线形同虚设，拍号的固有律动规律也失去意义，各声部按照不同的力度级进行自身的序进，乐队与独奏中胡形成模糊交织、镶嵌紧密的音响造型。这类节奏设计在中国作曲家的作品中实属非常罕见的大胆创新，也是作曲家一生创作生涯中的顶峰之笔！为国内业界，后生提供了极具价值的经验，值得我们尊敬！

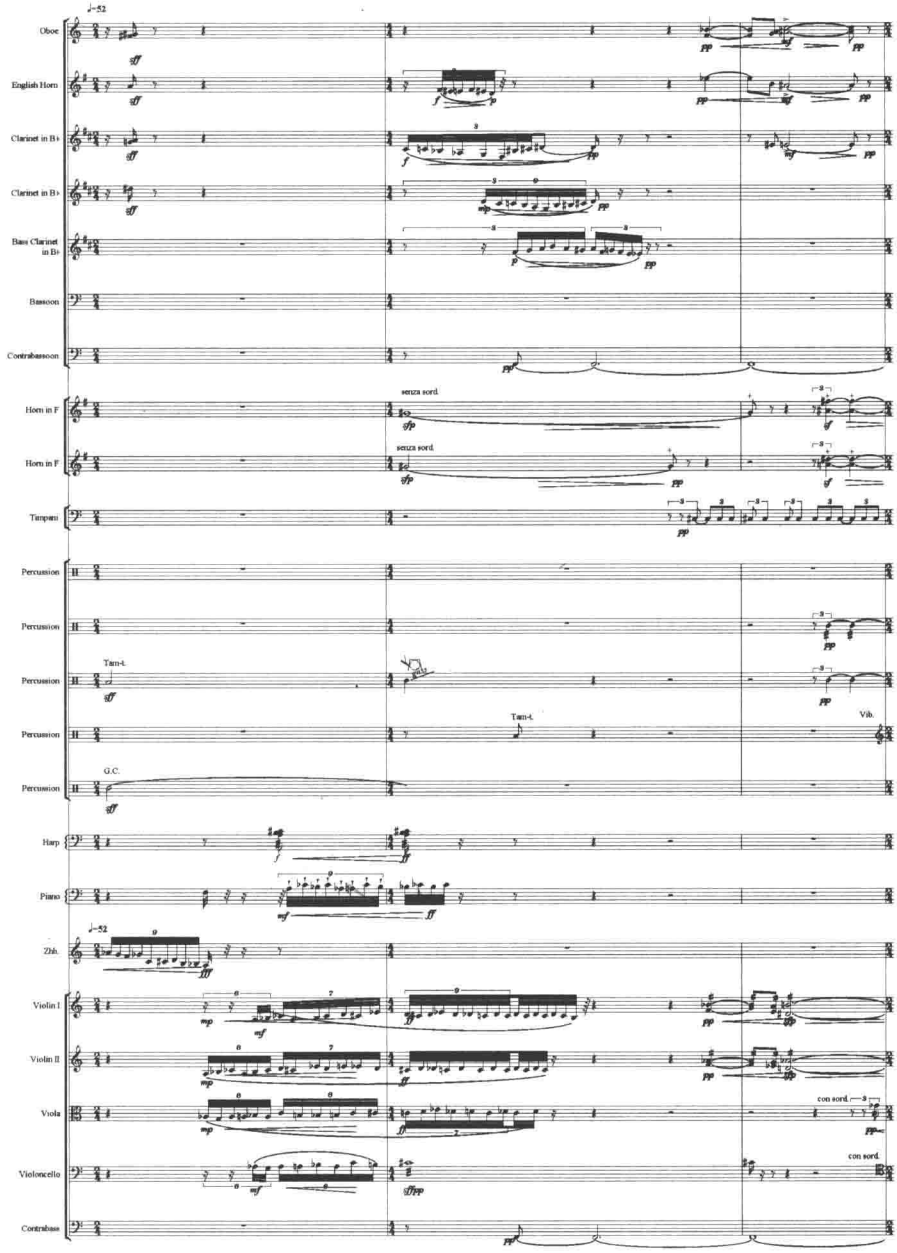
类似的子节奏层独立，多层复合的“不协和节奏”[9]整体音响织体还有许多，感兴趣的朋友可以研读总谱，自己总结，在此不表。

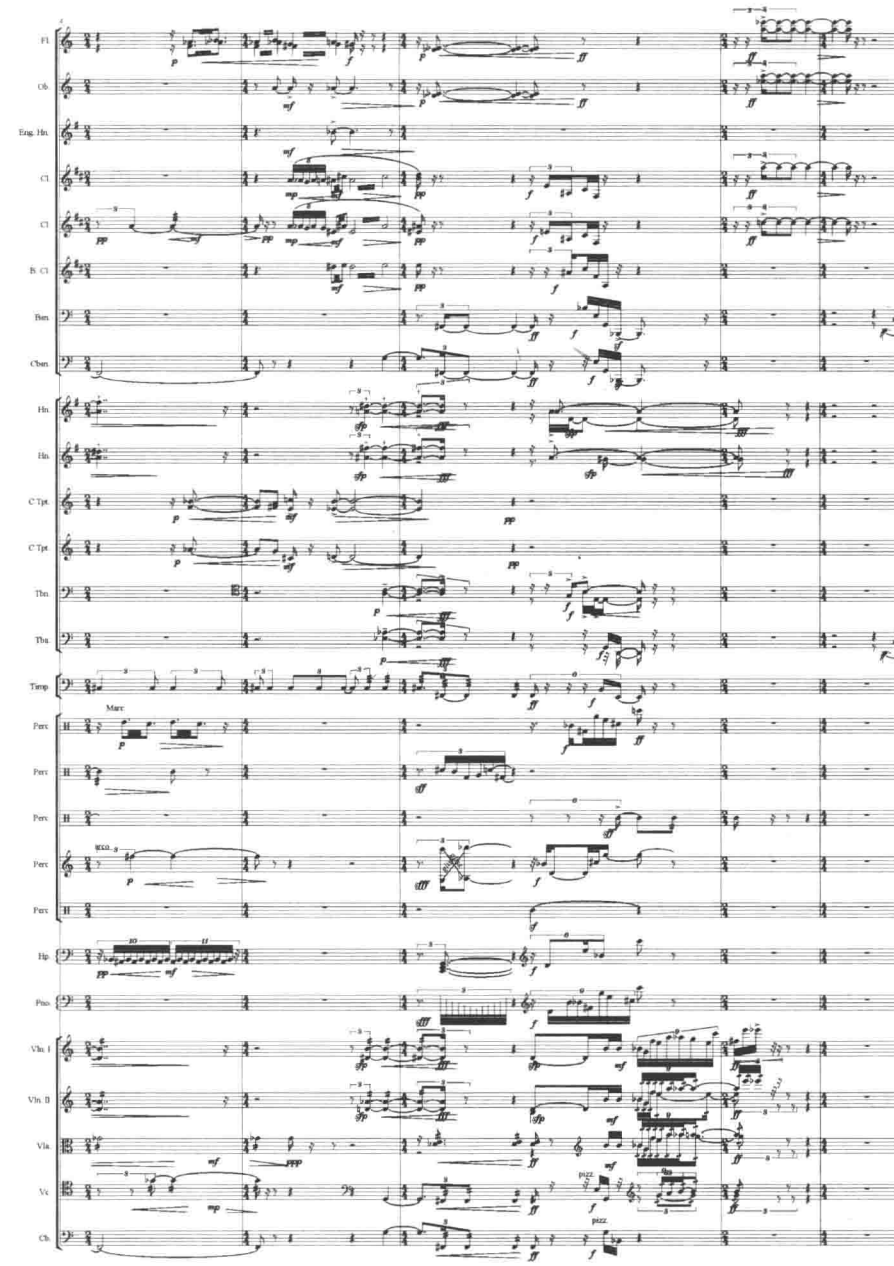
4. 面与场的肌理

我们知道任意二维相交直线或曲线就能构成面，它们通过纵向的和弦

相交构成三维立体，在时间中以声场造型呈现。根据现代声学常识理解，音乐音响最简单的陈述方式也是四维立体进行，我们需要训练自己透过二维谱面理解四维音响的能力，即便暂时忽略时间轴，也要从三维立体中去把握总谱。下面截取本作品具有创新意义的织体肌理片段进行分析。

例 218：杨立青《荒漠暮色》织体肌理　摘自总谱第 110—116 小节





以上截取谱例为作品进入高潮时的一段纯音响音色织体肌理，这种起阻断功能的音响写作，在现代音乐创作中非常重要，作曲家需要熟悉各种声音陈述的时间过渡性特征，才能有效运用它们不同的声音状态属性为己服务。这就好比在玩电子音乐时运用“通带滤波器”一样，倘若音箱里正在播放传统的古典音乐，通过使用低通、高通、带通、陷波滤波器的不同

调制，可以得到完全不同的声音音响，也可以阻断或稀释声音。如果再加入混响、延时、环绕效果器，还可以把声场拉长、缩短、重合、分解、回声、环绕……这些声音状态如若要在织体肌理中通过配器反映出来的话，就需要改变构成织体的因素形态，把线条（粗放、移位、淡入、浓入、清出、糊出、密度、厚度、分离、马赛克混合……）根据不同的目的作出相应的选择，这是音响音色作品必须要明白与掌握的技术手段。

本例正好是迫使独奏中胡强收，乐队闯入的音响状态片段，短短的 7 小节，力度标记使用了 16 级符号，即 ppp、pp、p、mp、mf、f、ff、fff、sf、sfp、sff、sffp、sfff、sfffp、sffz、sffpp。

更为夸张的是在一个单位拍内就有力度级从 pp 直接发展到 ff，而且同小节内不同的乐器，力度级各自独立。单从力度的发展线索看，就让人难以置信了，实际演奏能够严格做到吗？

节奏组合复杂程度较例 16 只有过之，没有不及！

节奏层间不仅仅存在有数列不协和节奏，而且有特殊节奏套着特殊节奏。如大三连音中套有小三连音，把基本划分、特殊划分、数列划分、特殊划分套着特殊划分进行纵向组织，横向挪位，混装在一起。使音响组合成一种“精确的偶然”效果。

谱例前两小节（总谱第 110—111 小节）使用弦乐与木管组异质搭配组合成一个高密度音响云团强制阻碍独奏中胡，金属棒刮擦大锣构成的粉色噪音与鼓棒击锣的余音给云团镀了一层金色外廓，圆号与低音大管、贝司嵌入中、低频支持。

第二小节（以本谱例计算小节数）最后一拍开始双簧及英国管、单簧管引入一个倍频音型，小提琴 I、II 先同度覆盖，再整体柱式偏移小二度演奏旁频干涉，使线条密度突置增厚，伴随震音及夸张的力度对比，线条加速粗放过渡到四只圆号阻塞，金属撕裂般地闯入，为渲染其不协和性，作曲家使用大锣和开镲滚奏加密音质硬度，再用弓拉颤音琴附和大提琴、第二单簧管奏出中高频染色，营造出余音缠绕的牵引。定音鼓、沙锤、竖琴在低、中频域增强颗粒性。第四小节引入的三只小号是前面木管倍频音型的变化重复，干涉作用转由木管组来担任，指震音模糊。圆号与铜管低音部的长号、大号相继密集叠入，随着第六小节色彩乐器竖琴、钢琴及整个打击乐组的进入，音响丰满度达到极大，织体因素音色化合，纵向干涉，横向移位，力度各表，中频持续，高低频反向延时扩张，形成深度网状交织的立体造型。这小节中各乐器组的收束方式，形成同组内部的直达声与反射声的延时，织体肌理富有声音声景学意义。

由此可见，追求现代音响音色的创作一定要冲出传统“四大件”的束缚，自觉地接受包含艺术与艺术以外领域的先进成果，尤其是声学和电子音乐方面的成果，有反叛的自觉和超越的自我，才有可能真正走出传统、走出民间、走出现代，面向未来，创作出具有社会性、时代性、广义民族性、个性，又不失思想性和艺术性的佳作。三部胡琴与乐队的创作语言探究从某个侧面记录了杨立青先生的思辨过程。他推崇情感、推崇理想、谱要我写之作，更热衷于创作我要写之作，集中国传统与西方古典音乐理论之大成，通西方现代音乐各种流派之精华，勇于开发自己并不很擅长的数理逻辑创新运用于创作实践，追求作品多元性的融合与平衡，最终结出累累硕果，震撼乐坛。

注释：

① 杨立青：《乐思·乐风——杨立青音乐文集》，上海音乐学院出版社 2006 年版，第 355 页。

② 交响乐（SYMPHONY）和交响曲是两个不同的概念，交响乐是由多件乐器所演奏的具有交响性的音乐，如协奏曲、幻想曲、随想曲、狂想曲、叙事曲、乐队组曲、序曲和交响诗等，而交响曲是指一种大型的管弦乐套曲，传统古典交响曲由多乐章组成，近现代也以单乐章形式出现。

③④ 周湘林：《音色音乐的早期探索——杨立青大型管弦乐《忆》的音色音响要素浅析》，《音乐艺术》2011 年第 4 期。

⑤ 张式业（1931— ），著名作曲家、指挥家，国家一级指挥，享受国务院特殊津贴。曾任前卫民族乐队指挥，艺术指导。主要作品有民族器乐曲《长征忆事》、《沂蒙山》、《一枝花》、舞剧《十八勇士强渡大渡河》音乐等。

⑥ 摘自人民音乐出版社 2007 年版。

⑦ 所有音程只能相对而言，在十二平均律量化精度下，音程本质上只有六种，音级数是 1、2、3、4、5、6。倘若量化精度提高到二十四平均律，音程数量本质上就有十二种，四十八律就更多……以上没有计算它们的转位音程，如需计算，在上述种类中乘以二倍。

⑧ 引自陈其钢、罗忠镕《巴黎——北京两地书》，《人民音乐》1986 年第 9 期，第 37 页。

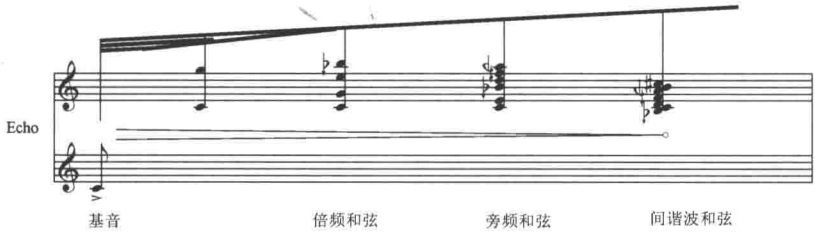
⑨ 名词引自张巍《音乐节奏结构的形态与功能》，上海音乐出版社 2009 年版，第 53 页。叶斯顿认为，所谓节奏的不协和是指使同一个节拍时值同时被分割为两个或三个（或更多的）相等的部分。只要在作品中发现两个彼此不能被简单乘除的（节奏）层次，便是不节奏的不协和。

第十七章 一个音引起的革命

《乐记·乐本篇》记叙："凡音之起，由人心生也。人心之动，物使之然也。感于物而动，故形于声；声相应，故生变，变成方，谓之音；比音而乐之，及干戚羽旄，谓之乐。"一部距今已有两千余年的古代儒学经典已经论述了"音·声·乐"的辩证关系。音是由人的心所发生的，是声作用于心的结果。声是由物动而产生的，声是音的外在形式。乐是两者的结合，且能为人耳目欣赏、可闻欲舞，是人心有感于物的抽象。

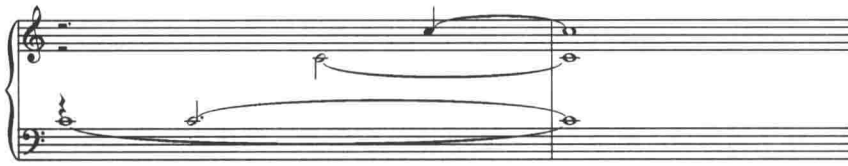
频谱音乐强调的"声本体"更多地偏重于现代物理学意义，指可以在任何弹性介质中传播的，且能为听觉神经所接受的声波的作用轨迹（触发—传播—消亡）的全过程。即发音体从"触发/Attack—衰减/Decay—保持/Sustain—释音/Release（ADSR 包络）的全过程"。客观物理属性主要有振幅和频率，而其主观感知特性则有响度、音高、音色和时长。频谱音乐这种对声本体微观的深入、极限的认识，正好成就了其对声音事物的宏观把握，进而总结出大的音乐创作的原则和态度。这种用显微镜探进去，望远镜拉出来的办法使其挖掘出另一番新天地。让人难以置信的是通向新天地的路径竟是由一个音发起，正可谓是观一叶而知天地，聆一音而悟有情。作为频谱音乐创始人之一的法国现当代作曲家提斯坦·缪哈耶在 1976—1977 年之间为钢琴创作了一部独奏曲《遗忘的土地》使用了大量的新技术和音乐声学成果，其中尤其以中央 C 的回声处理使人惊异，下面参见谱例：

例 219：缪哈耶《遗忘的土地》中央 C 的回音处理



乍看这个谱让人难以相信这是回声？回音是一种非常普遍的自然现象，凭借我们的生活经验，也知道它是声音的延迟、反射构成的回响，应该属于声音的卡农模仿。根据我们的一般经验，单独的声音，回声还是这个声音，音色的属性基本没变。但是本谱例的回声却用和弦形式来表现，

而且随着时间的延长，和弦变化得越来越不协和，以至于后面干脆把这个基音抽掉，有这样的回声吗？按照传统的理解，回声的谱例应该是下面的形式：

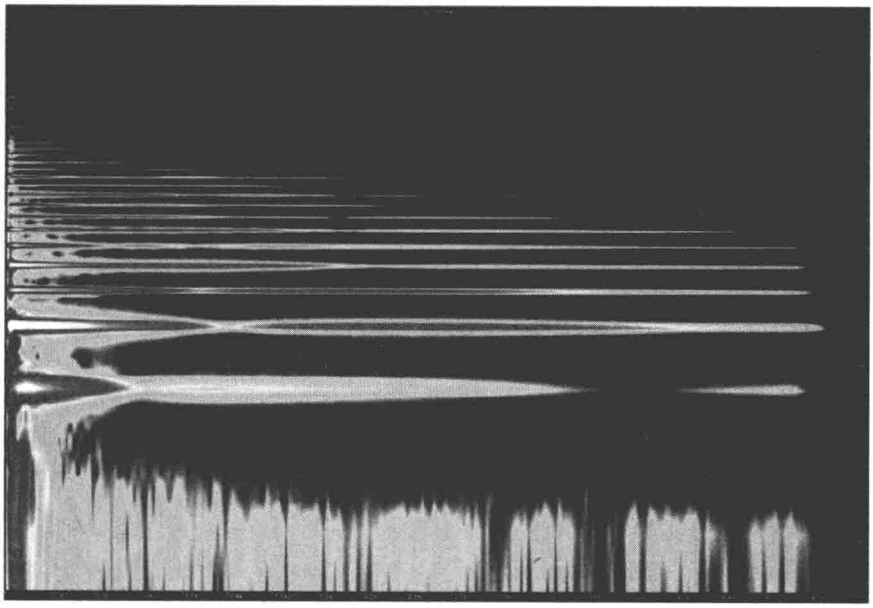


仅一个中央 C 怎么可能构成几组不同的和弦呢？如果例 219 也能称为回声的话，那么它是属于模仿还是对比复调呢？

我们已经知道乐音并不是纯音，而是复合音。也就是说，乐音是由基频音与它的 N 个谐频音（基础乐理称为“泛音”）共同组成的整体音响，其中振幅最大的音决定它的听觉主要音高，在其持续延长的过程中，仔细辨别还能听到许多别的谐音的存在。事实上，我们听到的钢琴、长笛、小提琴……无论什么乐器的中央 C 音，它们的主频音高都一样为 261.63Hz。在此让我们追问：既然频率一样，音色怎么会不同呢？传统的理解会认为它们属于不同类型的乐器，其材质、触发方式、形状结构皆不同，当然音色不同；那么再让我们追问：同样是九尺的斯坦威、雅马哈、珠江大钢琴，它们的音色会一样吗？即便都是斯坦威同样型号的钢琴，它们的音色也有差异。世界上绝对不会存在两台音色完全一样的钢琴，就如同世界上绝对不存在两个完全一样指纹的人一样，即便是双胞胎也没有这种存在的可能。探其究竟是因为指纹与频谱一样具有唯一性和排他性，真正音色改变的原因是因为它的频谱变了，也就是说由发音体产生的频率、振幅随时间代码产生的谱图变了。而当今的电脑科技水平已经发展到可以把一秒钟的声音样本（连续信号），切分成数万个瞬间切片（离散信号）[①]，音乐声学把它称为“采样率”。而采样频率必须至少是信号中最大频率分量的 2 倍，否则就不能从信号采样中恢复原始信号。人们的可听声范围是 20Hz—20,000Hz，最高频率是 2 万赫兹，那么对它进行采样，其采样率最低不能低于 4 万赫兹，采样率越高，恢复原始信号越逼真，音质越好。比如 CD 的采样率是 44.1KHz，它意味着每一秒钟的 CD 音响需要切成 44,100 个离散信号记录在光盘上，而 DVD 的采样率是 48KHz，电台、专业录音棚使用的采样率更高，可以达到 96kHz—192KHz 的水平，它要求媒介载体（光盘、硬盘、MD 袖珍盘、DAT 数字音频磁带……）存储量要倍数递增，CPU 的计算速度要几何增长，其最终音响极大地还原和美化了

原始声音。可以说，我们对一秒钟的声音样本的认识已经进入了极限微观的纳米时代，分子、原子、电子、离子这类计数单位都太粗略了！这是一个无限神秘的微观世界，绝不是一个基音和几个五度、八度音高那么简单。下面看笔者采集的家用自备钢琴中央 C 的频谱图。

例 220：家用自备钢琴中央 C 的基频放大频谱图[2]



上图横坐标为时间轴，单位：秒；纵坐标为频率轴，单位：赫兹。

频谱中的红色表示强振幅的倍频音高，黄绿色表示中强振幅的旁频音高，蓝色表示弱振幅的间隙波音高。后加的阿拉伯数字表示谐波序号，基音为 1，第一泛音为 2，以此类推，由图可以看到如下特征：

(1) 起奏（Attack）是由低频向高频逐渐呈现。

(2) 衰减（Decay）是由高频音开始向低频音延伸。

(3) 保证（Sustain）是越靠近基音的谐波泛音持续特征越明显。

(4) 释音（Release）仍然按先高频再低频顺序进行。

(5) 基音的下方有沉音的存在，并且一直伴随整个泛音系列。

(6) 每一个倍频音高的周围都包围有旁频、间隙波。

(7) 2 号谐音（第一个泛音）振幅最强，甚至超过了基音的强度。

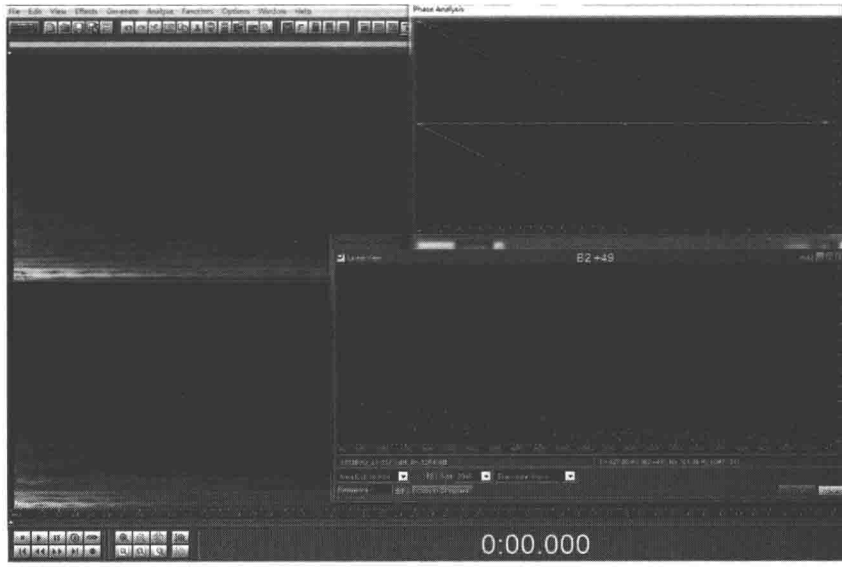
(8) 3 及 3 的倍数谐音振幅相对较强。

(9) 距离基音越远的谐音，奇数序号振幅强于偶数序号音。

注意：上述特点仅是对于此琴此音而言，它具有钢琴的一般性，也有

唯一性，其特征的辨析度会随量化采样率的提高而提高。比如上图的时间单位是“秒”，采样率为 1,024Hz，其辨析度只略高于传统乐理水平，主要反映出基音的倍频谐音情况。下面，以同样的声音样本再做一组更加精确的频谱分析，把时间单位精度提到毫秒（1 秒＝1000 毫秒），采样率提升为 44,100Hz，音高精确到音分，软件默认中央 C 为 C4。由于离散信号过于繁杂，受篇幅所限，下面仅提取几个采用点来求证例 220 的信息。

例 221：精确量化家用自备钢琴中央 C 的频谱分析组图一　0 毫秒起点[3]

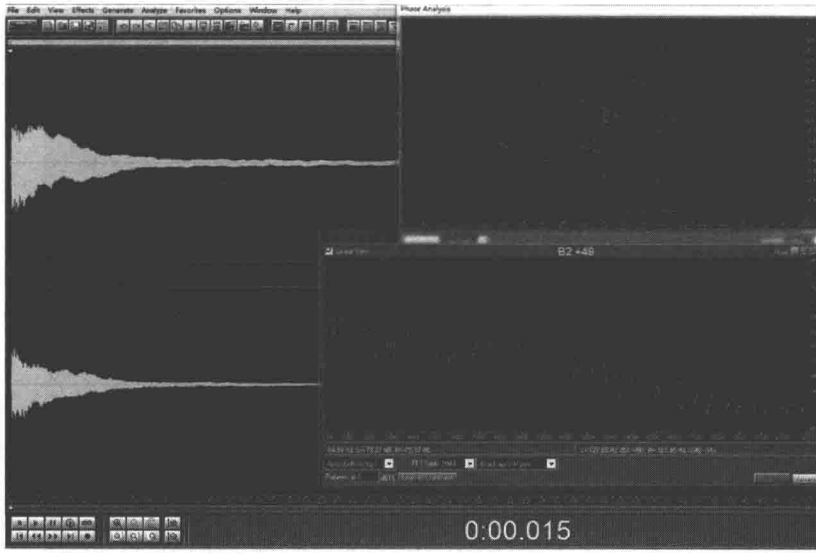


上图：左上为左声道谱图，左下为右声道谱图。

右上为相位分析（Phase Analysis）图，按照经纬 360°全方位划分。

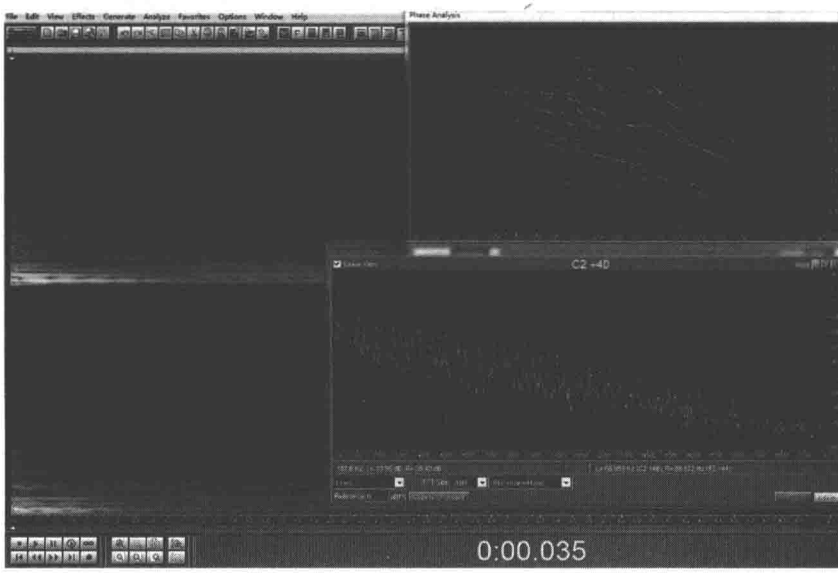
右下为频率分析（Frequency Analysis）图，横坐标每一单位格为 1,000Hz，范围取 0—22,000Hz；纵坐标为振幅，范围取－120—0 分贝（dB）。图中的蓝色马齿龈记录左声道的频率分布情况，红色马齿龈记录右声道的频率分布情况。

例 222：频谱分析组图二 15 毫秒处离散图



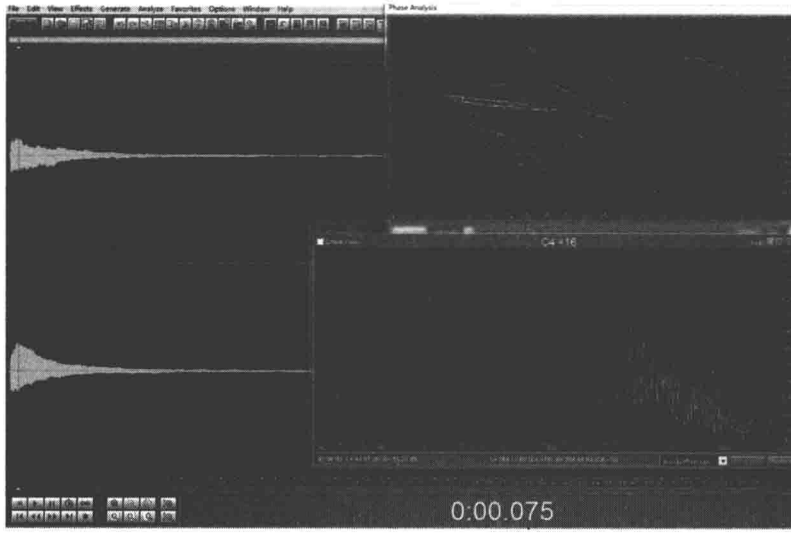
左侧左右声道换成波形显示，相位右旋 180°重于左旋，频率共振峰为 127.08Hz，转换成音名即 B2＋49 音分（比基础乐理大字组 B 高四分之一音）。

例 223：频谱分析组图三 35 毫秒处离散图



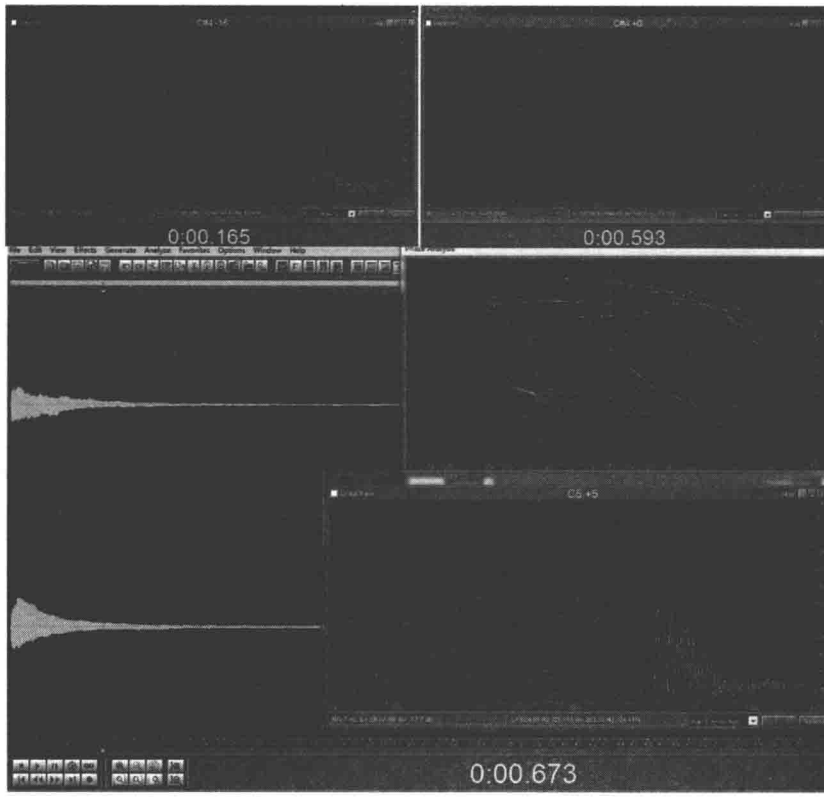
左侧恢复谱图显示，相位左右平衡，频率以线性马齿龈标示，共振峰频率为 66.959Hz，即 C2＋40 音分，近似于基础乐理大字组 C 高四分之一音。由组图二、组图三可见沉音 B2＋49，C2＋40 先于基音出现。

例 224：频谱分析组图四　75 毫秒处离散图



自此基音出现，共振峰频率为 264.13Hz，即图中 C4＋16 音分，相位右旋。

例 225：频谱分析组图五　165、593、673 毫秒处离散图

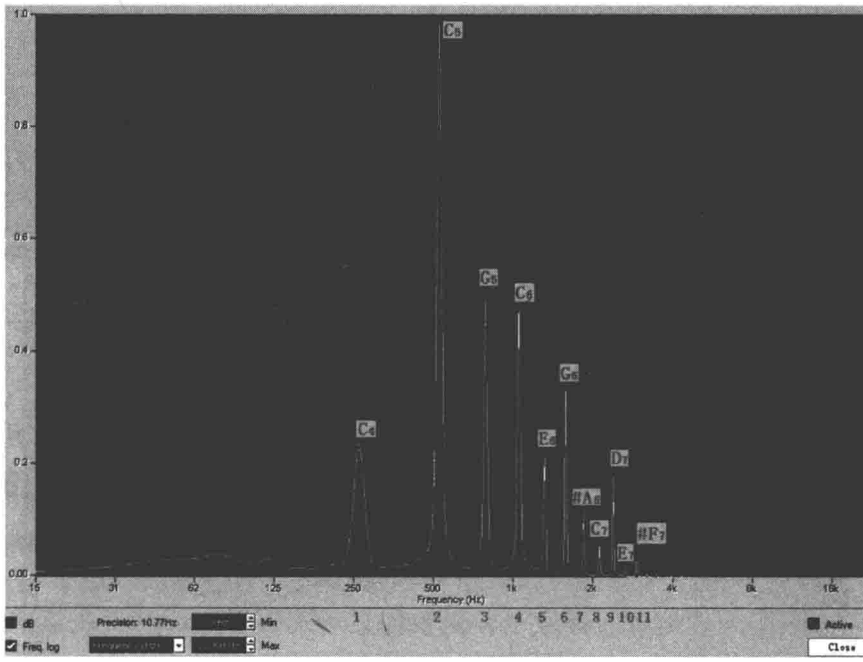


165 毫秒处出现比中央 C 高不到半音的旁频音高，即 C♯4－16 音分，频率为 274.61Hz。

593 毫秒处出现比中央 C 高半音的间隙波音高，即 C♯4＋0，频率为 277.19Hz。

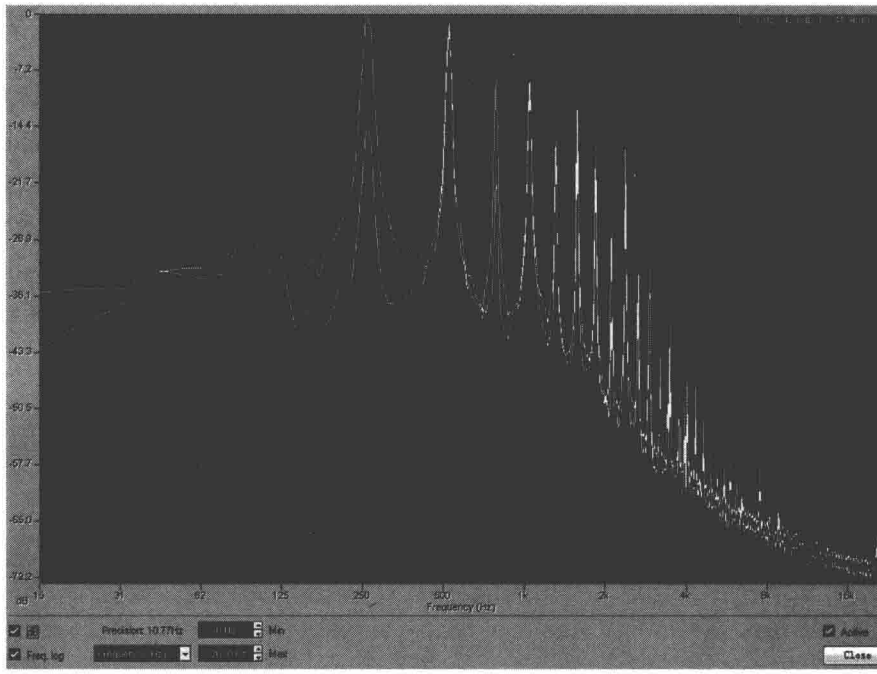
673 毫秒处出现比中央 C 高八度的第一泛音（谱例 220 的 2 号谐音），频率为 524.98Hz，即图谱中的 C5＋5 音分，相位与上述每个图对比都有明显变化。同理，可以提取其余谐音的离散图片，仍然能发现每一个倍频音高周围都覆有旁频、间隙波的存在，因图片的繁琐，不再类同赘述。下面以频率·振幅二维分析，换一个角度再来做一个中央 C 左声道单独的频谱呈现。

例 226：自备钢琴中央 C 左声道频率·振幅二维分析频谱图



图示反映的特征与例 220 完全吻合，基音（C4）与各泛音的振幅强度一目了然，甚至过于清楚，看不出旁频与间隙波的存在，这是什么原因呢？是因为上例仅仅提取单声道，并做了滤波净化处理，使得谐波系列仅反映倍频特征，也就是传统乐理的泛音规则。如果再把它转换成左右声道立体取样，同一个声源的频率·振幅动态切片离散分析会呈现如下图谱。

例 227：自备钢琴中央 C 左右声道频率·振幅二维动态切片分析频谱图



可见曲线反映要复杂得多，每一个谐波泛音外围都镀有一层金边，以此可以证明旁频、间隙波的存在。

旁频、间隙波存在的原因很复杂，抛开物理学因素不说，图中揭示左右声道产生的拍音及相位差也是一个主要原因之一。通过上述实验证明在音乐领域，常规乐器发出的乐音和噪音中不存在纯粹的倍频音高，倍频、旁频、间隙波是不可分的整体。由此得出下列结论：

中央 C 的回声，绝对不仅是它本身，而有更多的音高存在。

传统音乐理论中的单音、音程和各类形式的和弦都仅反映了声音存在的一个方面，即基音和倍频音的规律。不是声音的全貌。它们仅仅强调了“身”的作用，而滤掉了“影”的功能，具有一维陈述局限性。

音乐创作不仅要重视音高，更应该重视音的延续过程，在这丰富绚丽的过程中，谐音的依次出现、保持、消失，共振峰频率的转接，相位的变异，谐音系列形成的拍音和干涉作用都是创作的重要因素。

音源直射和多次反射在传播过程中形成的环绕、混响、循环、延时、回声等声学现象在现代音乐创作中已经成为作曲家越来越重视的组织结构

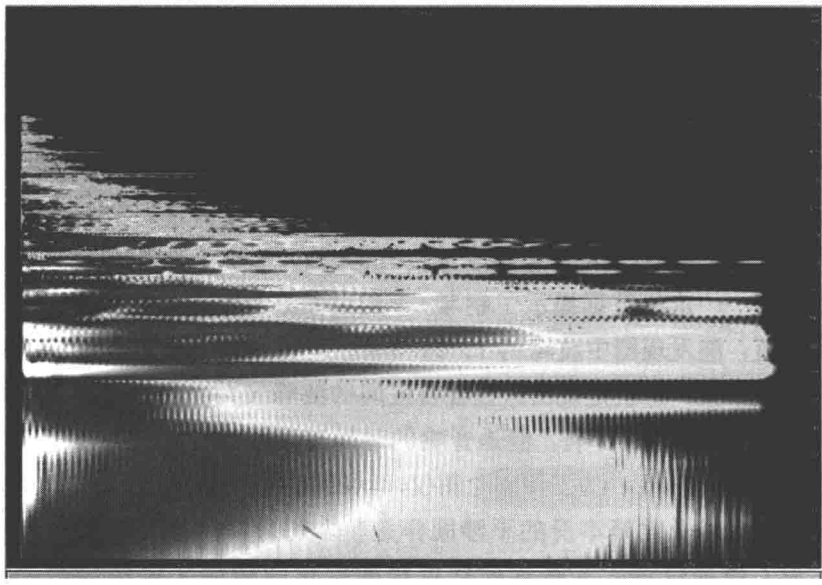
力因素。如例 219 所示。

对于声本体的无限揭秘，声景、声场、声音生态学的态度，促使了创作技术与手段的不断更新，艺术与科学越来越紧密地联姻成为当代艺术的重要特征。

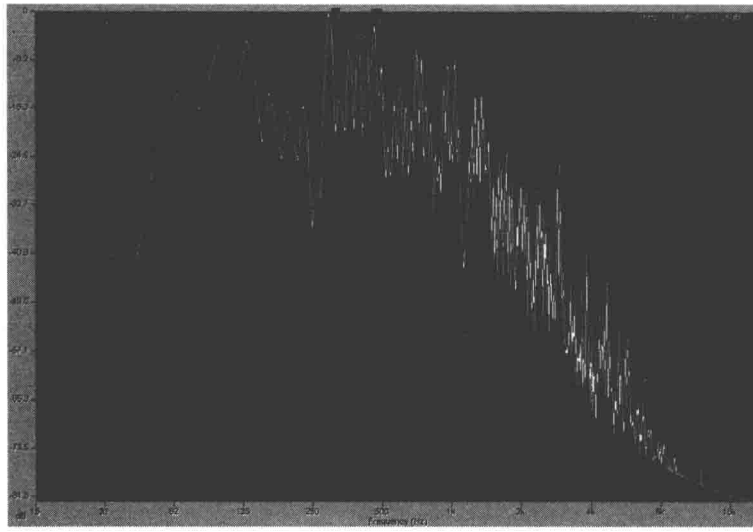
了解上述结论再去看例 219 谱例就不再有任何秘密，然而作曲家在 40 年前就已经掌握了这些秘密，并为之付诸实践，创作作品，以此为方向不懈努力，终于成就了频谱音乐流派的确立。在个性创作成为主流的当下产生出一个影响世界的潮流，又一个惊奇！这才是最让我们敬仰的大举！我辈尚需努力。下面再来关注实验泛音的情况。

实验泛音就是指以实验数据为准的现实泛音，以下笔者以著名软音源 East West 公司出品的 Colossus 综合音源中的大钢琴为准，测试它的 C1 的频谱分析情况。

例 228：巨人（Colossus）音源大钢琴 C1 频谱分析组图



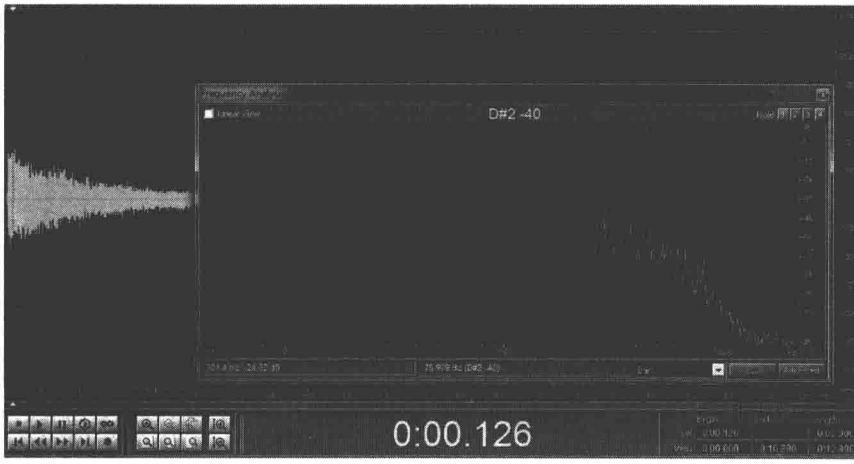
A 基频放大



B 频率振幅动态图

可见基频 1 号音的振幅并不强，振幅最强范围出现在约 290Hz 和 462Hz 处，即上图 9 号与 14 号谐音处。通过例 2 我们知道基音 C1 的频率是 32.59Hz，振幅处于－40dB 以下，是作为沉音出现，听辨不清。能听到的第一个音是基音的 2 号谐音（1 号泛音 C2），65Hz 处，其后的 3、4 号谐音振幅依次增强，5、6 号谐音振幅逐渐减弱，7 号回升，8 号降到低点，9 号达到最大峰值，10 号急速衰减，11、12、13 号反弹增长，14 号到达第二峰值……这些数据揭示了钢琴 C1 的谐波系列特征，仔细对照例 222 的频率值，能发现图中波峰的 1、2、3……阿拉伯数字正好与谐波系列的倍音序数一致，也就是说由这些各自区间的波峰（共振峰）音共同集合成了钢琴 C1 复合音的音响。但是音响的时间过渡性、音色等特征不仅取决于 N 多的共振峰音（为了便利上图仅标示出前 14 号音），而且波峰到波谷的迂回过程以及波峰本身的干涉同样是整个音响世界不可或缺的组织因素。为了清楚论证，下面再列举更精确量化的频率・振幅参数。参见例 229。

例 229：116—126 毫秒截图大钢琴 C1 频率·振幅马齿龈图



上图为音频分析软件 Cool Edit Pro 2.1 对声音样本的取样分析，图中时间单位为毫秒，取时长度 10 毫秒，频率范围 0—22,000Hz，最小精确量化度 10.766Hz，振幅范围—137—0dB。

由上面的预制条件可以算出，在 0—2,2000Hz 范围内，每一个离散图提取了 22000÷10.766≈2044（个频率切片），受篇幅所限，下文列出前 98 个切片频率的完整数据，另加钢琴 C7、C8（传统乐理 c^4、c^5）以及最后一个切片频率音高参数。

例 230：116—126 毫秒截图大钢琴 C1 频率·振幅实验数据

Freq/频率	Ampl. /振幅	Freq/频率	Ampl. /振幅
0	—103.155052185	107.666	—44.561660767
10.766	—78.194923401	118.432	—27.773080826
21.533	—63.332893372	129.199	—27.520067215
32.299	—63.271179199	139.965	—33.565395355
43.066	—68.397407532	150.732	—40.285511017
53.833	—45.810558319	161.499	—34.124481201
64.599	—38.14018631	172.265	—39.402370453
75.366	—42.496456146	183.032	—49.964424133
86.132	—35.716972351	193.798	—43.891384125
96.899	—30.071130753	204.565	—46.306232452

Freq/频率	Ampl. /振幅
215.332	−46.093566894
226.098	−38.155570984
236.865	−43.300247192
247.631	−55.525691986
258.398	−54.760181427
269.165	−50.603496551
279.931	−34.893032074
290.698	−25.747888565
301.464	−27.022968292
312.231	−37.668579102
322.998	−34.505161285
333.764	−38.352973938
344.531	−43.96905899
355.297	−33.109867096
366.064	−34.353946686
376.831	−44.968326569
387.597	−35.755977631
398.364	−34.149436951
409.13	−41.121612549
419.897	−33.535427093
430.664	−32.290237427
441.43	−41.731456757
452.197	−32.573402405
462.963	−28.8288517
473.73	−36.889076233
484.497	−38.56552124

Freq/频率	Ampl. /振幅
495.263	−32.255092621
506.03	−39.573364258
516.796	−61.366287231
527.563	−50.653636932
538.33	−55.218444824
549.096	−50.860240936
559.863	−40.391658783
570.629	−43.303833008
581.396	−49.735137939
592.163	−38.515132904
602.929	−38.428939819
613.696	−48.559886932
624.462	−47.433937073
635.229	−46.564922333
645.996	−59.412742615
656.762	−43.81671524
667.529	−39.971530914
678.295	−49.089065552
689.062	−45.41211319
699.829	−33.508197784
710.595	−36.689693451
721.362	−43.895397186
732.128	−35.679519653
742.895	−37.814605713
753.662	−58.191116333
764.428	−45.497909546

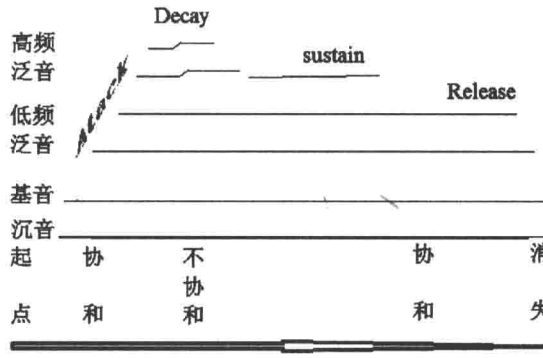
Freq/频率	Ampl. /振幅
775.195	−40.854930878
785.961	−44.641357422
796.728	−56.530677795
807.495	−48.834766388
818.261	−56.554683685
829.028	−53.701248169
839.794	−47.38092804
850.561	−56.214122772
861.328	−53.63457489
872.094	−62.593524933
882.861	−59.435138702
893.627	−58.894207001
904.394	−47.038825989
915.161	−35.27117157
925.927	−36.411632538
936.694	−44.735774994

Freq/频率	Ampl. /振幅
947.46	−34.918087006
958.227	−32.012424469
968.994	−42.31098938
979.76	−46.186374664
990.527	−41.065734863
1001.293	−46.603996277
1012.06	−47.446086884
1022.827	−38.39598465
1033.593	−37.550086975
1044.36	−47.629402161
……	
2304.052	−62.193122864
……	
4489.672	−66.178260803
……	
22039.233	−134.742996216

需要说明的是，由于最小频率精度（10.766Hz）还不到基音频率（32.59Hz）的三分之一，所以不要把倍音列的序号与上图取样序号混淆。上图不仅反映了倍音的频率，而且还提取出了旁频、间谐波的频率。也就是说，既提取了整数倍的谐波频率，也提取了非整数的谐波频率。通过例228我们已经知道，泛音列都是建立在谐波系列的整数倍音上，它们通常都是所在区域的共振峰音，振幅能量相对大。根据这个特征我们从基频音开始，把每一个区间的相对振幅强音用红底标识出来，其上下相邻的频率取样点一般都要弱于该音的振幅。上例到581.396Hz都满足这个条件，每相邻共振峰之间夹有两个振幅稍弱的频率点，它们就是旁频和间隙波。但是从592.163Hz至785.961Hz处，频繁出现倍频、旁频振幅倒置现象，证明在这区间存在谐波失真。另外，倍频取样点间隔有一、二、三、四个不等的旁频和间隙波的存在，它证明在钢琴C1的谐波系列中，越靠近基音

的谐波（泛音）越协和，越远离基音的（谐波）泛音越不协和。也可以说，越低频谐波越协和，越高频谐波越失真。

钢琴 C1 折射出的时间过渡性特征如下：



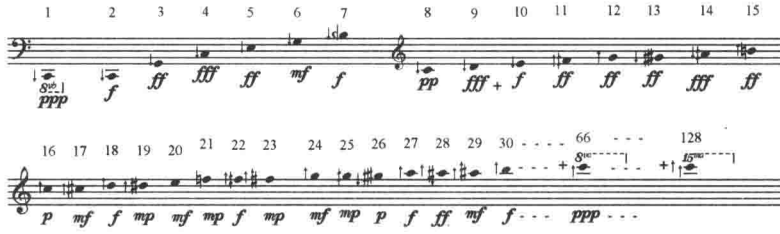
另一个需要说明的是，为什么例 229、例 230 选择提取 116—126 毫秒处的截图，而不提取别的时间段的截图？这是因为基音的谐波并不是一起产生的，由低频向高频发生存在一个时间差，即起奏（Attack）时间在本时间段内钢琴 C1 的谐波泛音达到峰值，谐波系列中的所有的分音都已经出现，故而最具有代表性。当然也可以提取别的时间段，1 秒钟内可以提取 100 个这样的时间段，但最具典型意义的是峰值时间段，其余时间段主要用于过程参考。

下面再把例 230 的振幅数据转换成传统乐理常用的力度记号，只取整数，小数省略，注意例 230 中振幅为负值。

振幅范围（—负值）	25—29	30—34	35—39	40—44	45—49	50—54	55—59	60—64	65—69
力度符号	fff	ff	f	mf	mp	p	pp	ppp	pppp

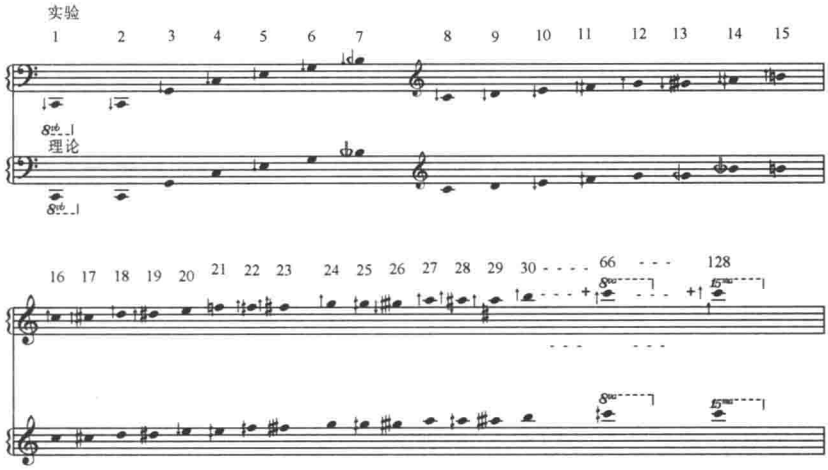
根据上表力度转换，再次提出例 230 中的基音和倍频泛音可以得到下列实验泛音力度分布图。

例 231：1—30 号实验泛音力度分布图



仔细观察会发现，实验泛音与理论泛音及十二音平均律在音高上都存在出入。具体特征是：11 序号以下的实验泛音，包括基音普遍低于理论泛音和十二平均律音高；从 11 号开始迂回高于理论泛音和十二平均律音，越往高频发展，偏离越多。见下面谱例比较。

例 232：理论泛音与实验泛音的音高对比（序数按照倍音提取）



可以看出实验泛音与理论泛音的音高偏差是显而易见的，这是什么原因造成的呢？这是由于钢琴的频谱带有谐波畸变，从而造成了分音失真，使得它的实际音高略微偏移了理论音高，最终加强了钢琴音响的不协和性。

一花一世界，一叶一如来，本章以钢琴 C1 为基音，理论与实验对比研究，分析了它的泛音及其谐波系列非整数分音情况，其意义不仅在于泛音自身，更在于音乐作品结构力因素的影响和促进，进而更加完善地建立起与声音对象水乳交融的和声、复调、曲式、配器纵横组织结构，这对于音乐的创作和研究，声音的还原、造型、创新都具有深远意义。

本书重点是侧重于作曲技术，尽管频谱音乐作曲家杰勒德·格瑞瑟、提斯坦·缪哈耶自谦地说“频谱音乐不是体系，只是态度”，但作为作曲专业的研究论著，笔者已别无选择，只能“明知山有虎，偏向虎山行”、“避重就轻”地理出它的“体系”。这个“体系”更准确地说是“准体系”，具有很强的个性化色彩，是以我之角度、我之兴趣、我之能力予以遴选总结，其中不免会出现许多主观化的认识趋向，对于一些问题的讨论也会因为对象的放大而言过其实，其折射出的艺术品质、技艺方法仅仅是片面的、局限的，甚至于是武断的、相互排斥的个体显现，它做不到整体的一般。或许笔者现在做的事已经违背了频谱音乐作曲家的本意，他们希望自己的东西不要成为“新的教条”，不要成为“另一种武断、霸权、主观的体系”，不要成为约束人们思想的一种“新的桎梏”。正因为这样，他们才没有去立书著撰，本来想留给受众一点神秘、模糊、玄幻，可能已被笔者曲解。对此，衷心希望前辈和同仁的指正。

需要强调的是，本书主要是研究频谱音乐的创新贡献及它在世界音乐史发展历程中的积极意义，并不是说它就没有缺点，更不能把它看成是拯救现代音乐的灵丹妙药。历史上从来没有出现过众口一词、推崇备至的流派和作曲家，每一个流派及作曲家还原到他所处的时代，都会引起众说纷纭的意见，有的赞同，有的反对，真正的灵丹妙药是不存在的。频谱音乐也不例外，它同样会存在它的局限性，就笔者个人角度而言，以下是笔者能看到的三点缺憾：

（1）频谱音乐没有摆脱电子音乐的影响，即使乐队之中没用一件电子乐器，电子的痕迹还是存在。

（2）频谱音乐要求回到声音的本质，揭示声音的自然属性是建立在当代自然科学发展的已有成果之上，许多结构因素都得到更精确的量化、分类，这本来是件好事。但是在一个作品里面往往构成作品结构基础的声音频谱并不只是一个，这不可避免地会出现多个声场系列，从而繁化了组织作品的音高素材，使作品不能保存从一而终的统一性，进而不得不放弃唯一性和纯粹性，这又不能不说是个缺憾。

（3）量化精细必然导致谱面繁杂，演奏相对困难。应该看到，优缺点的辩证关系，上述所谓缺憾一旦失去，或许频谱音乐就不存在了。

优即是缺，缺即是优，两者相辅相成。对此，我们要保持清醒，既不超越历史苛求于人，也不盲目崇拜，夸张美化。继承传统，敬畏先哲是对一个学者最基本的要求。理论虽没有永远的权威，但若想突破也是难上加难。只有哪些博览群书，通今博古之贤者才能相对客观地还原历史的本来

面目，以人性、实际的眼光来看待这些历史人物。频谱音乐正是建立在对序列音乐的异化之上，它把握住了序列音乐的局限性，才能“逆流而上”创造出有别于它的新型音乐，这种绝不盲从的态度是最值得我们学习的。事实上，当频谱音乐成行以后，跳出来看，它与序列音乐的传承意义不言而喻，一目了然。西方推崇的“吾爱吾师，吾更爱真理”而表现出来的永无止境的真理性、求知性、否定性态度是值得我们学习的。

频谱本身不是缺憾，它是一种手段，一种新的，尚未被多数人了解的手段，没有它人们对声音的认识只能停留在“耳听为虚”的境界。

频谱不足才是缺陷，那就会失去一种非常有效又科学的认识声音的途径，频谱能提供“眼见为实”的事实证据。分辨率越高，它的优点体现得越充分。

频谱只是揭密声音的属性问题，它并不试图去解决音乐的问题，音乐的问题还是靠人的主观能动性。怎么去利用频谱（或者根本不用频谱）来创作音乐，那是作曲家决定的“道法”问题。

音乐的神奇就在于它无为无形，不可绝对，没有定式之上，有时未臻完备的技艺也能变成一种长处，其中奥妙值得玩味。

笔者并不以为自己发现了所谓“频谱音乐”的答案，倒是因为其变幻莫测、难以一言而穷尽，而被这一课题显露出的学术魅力所吸引，其内涵的丰富性使人有如临富矿时的兴奋，随时可能出现的思想发现，组织奥妙，都使我激动不已。笔者祈盼这种内心感悟能通过本书的阅读传递给读者们。

注释：

① 现在个人电脑都能达到每一秒数万次，中国的 2010 年制造的“天河一号”超级计算机每一秒钟达到 4700 万亿次运算速度。

② 使用德国 Magix 公司出品 Samplitude Music Studio17 软件分析。

③ 使用美国 Syntrillium Software Corporation（现 Adobe Systems）公司开发的音频分析软件 Cool Edit Pro 2.1 分析。

结 论

频谱音乐是强调“声本体”的音乐流派，透视、解析声音，揭示声音的本质是这种音乐流派的根本所在。它要求对待声音，首先要过滤掉一切声音以外的形式内容，尤其是要去除掉人为的“武断”、“专制”的“主观体系”，建立尽可能客观的声音参数信息，以此作为构成音乐作品的基石。它要求充分利用现代科技的认识成果，拓展研究声音本质的途径，揭密万世不竭的声音秘密。为达此目的，对于声音对象的谐波属性、声音合成、频谱语图的探测揭密成为其主要手段，电脑及专业软件成为其主要的辅助作曲工具。在音乐创造的整个过程中，它提升了音乐作为“科学艺术”的含义。

这很容易使人产生一种错觉，即频谱音乐在强调“科学艺术”的同时，势必会减弱音乐作为一种艺术存在的“音本体意义”。毕竟音乐不是科学，不是语言文学，所以科学至上和雄辩、叙述事件不应该是音乐主要的事情（不是音乐的唯一），音乐的本质更在于它区别于科学和雄辩的文字、属于自己所独有的属性方面。比如说，音响性，科学的性格、语言的性格、心理学的性格、物理数学的性格不可能代替艺术的性格，因此说，艺术具有自身的唯一性。

频谱音乐从来就没有割裂“声”与“音”的联系，相反是强化了它们的联系，就像作用力与反作用力共存一体。对于声音的精密、微观化探秘正是为了更好地去掌握精髓，合理地运用它们为音乐作品的创作服务。他们强调“考察声音，不是作为一个静止的物体……而是把它作为一个赋予生命的事物”就是要考察生命事物的全过程，也包括主体与客体的关系，并由此提出了“时间的延伸和连续性”问题，这成为了频谱音乐的标志性“口号”。为此，他们才能在作曲技术理论的各个方面创造出有别于前辈的卓越成果。运用科学，渗入语言，借助数理，赋予哲学思辨都是为了深化、拓展音乐艺术的内涵、外延和技艺。

频谱音乐直接受惠于现代科技的发展，尤其是电子音乐与电脑的普及为其提供了实现抱负的可能，频谱音乐是一种具有严肃态度，专业思想，高贵气质的现代音乐流派。本质上属于音色音乐，音色音乐是由序列主义鼻祖勋伯格发明，频谱音乐事实上成为了对序列音乐的一种发展。尽管两

者又有不同，而且早期频谱音乐还是高举“反序列”的大旗，反对“霸权、主观、武断”，但就其音色、音响性质而言却是“一脉相通”具有传承意义，这点在“后频谱”时期的作品中表现得更加显著。频谱音乐的重大贡献就在于它创造出一种“视在语言”使得音响、音色属性分解成更加细微的，可供量化操作的具有指标，进而深化发展了音色音乐的组织方法。使得音乐更迈向纯粹与透明。

以下就本书研究频谱音乐中所涉及的有关要点再进行一个总括性的陈述。

第一，上篇就频谱的概念及频谱图所包容的内容参数，泛音列的范围，从理论与实验两个角度对比性地研究了基音的谐波与谐波系列的线性与非线性分布情况，对于谐波与谐波失真；倍频、旁频、间谐波；共振峰、质数泛音及微分音出现的条件作了逐一研究，它为频谱音乐的结构力因素的组成奠定了基础。

本篇提出了一个重要结论：频谱音乐是以声音生态学的态度，通过频谱的测试找到第一集合因素，其中波形对于音高素材的提取具有决定性作用，滤波器是雕刻改变声音的最有效工具，而后运用声音合成技术来生成线性、非线性矩阵，以此构筑作品的纵横组织结构。谱面音程间距的均等并不等于频率间距的均等，这是两个完全不同的概念。

第二，中篇第六章通过旋律形态分析，从外围切入，先来研究频谱音乐作品的第一阵面——旋律形态特征。得出射线型旋律、直线型旋律、拍音型旋律、锯齿型旋律、阶梯型旋律、带状型旋律、合纵型旋律七种类型。通过分析，得出频谱音乐的旋律形态是朝两个极端拓展，动静有致。

第三，第七章提出倍频和弦、旁频和弦、间谐波和弦概念，并且结合作品实例求证，总结出频谱音乐和弦连接的逻辑依据，“倍频和弦—旁频和弦—间谐波和弦”成为频谱音乐和弦连接，协和序进的主要逻辑依据。

第四，在频谱音乐的复调特征中总结出回声、共鸣、循环、音色、合纵、速率、多维、环绕构成的八种复调类型及其创新意义。

第五，在频谱音乐的曲式原则中重点论述了时间过渡性、自我繁殖与自我破坏（阻断）、可预测与不可预测、协和序进四大原则，并且通过声音状态分离，ADSR 包络分析结合作品逐一求证。同时阐述了频谱音乐在曲式领域的发展脉络及其成因。

第六，频谱音乐的节奏参数值由量化精确度与波形取样决定。

第七，在频谱音乐的配器原则中，再度论证 ADSR 原则、协和序进原则，分起奏（A）和 DSR 阶段来分段论证时间过渡、协和序进在配器领域

的至关重要性。同时，增加了一个“模糊原则”分别从干涉作用、旋律解构、节奏分离、发音点错位、麻花旋律、多维复调多个层面研究总结出频谱音乐制造模糊的手段方法。进而总结出时间过渡、协和序进、模糊原则是音乐艺术的重要原则。

第八，下篇选取法国频谱音乐以外的六部作品为例，检验这一理论成果对于不同风格、不同国籍，尤其是对于中国作曲家的创作实践的指导意义，探索它对创作前的案头准备，创作后的音乐形态等领域运用的科学性、艺术性、适度性。另外，增加了第十七章（一个音引起的革命）最新实验数据，较之于法国国家声学 IRCAM 实验室论证参数（见上篇例 17、例 18）更为精确、仔细，为微分音的存在及谐波系列的规律提供了实证科学结论，同时也提升了实践意义。

音乐乃奇特的悖谬之物。它无所不能，无所不可，逻辑、反逻辑，原则、反原则同时并存。法、无法、道法自然，到处折射出一种智慧状态，这是很难用文字描述出来的，借用老子《道德经》的第一句话“道可道，非常道”的一个被普遍接受的解释“可以说得出的道，就不是永恒的道”，我们共勉。

主要参考资料

(一) 专著类

1. 21 世纪高等院校优秀教材《实用语音识别基础》，国防工业出版社 2005 年版

2. [美] L. R. 拉宾纳、R. W. 谢弗：《语音信号数字处理》，朱雪龙译，科学出版社 1983 年版

3. 杜功焕、朱哲民、龚秀芬：《声学基础》，南京大学出版社 2001 年版

4. 孙正兴：《计算机图形学教程》(重点大学计算机教材)，机械工业出版社 2005 年版

5. 杨立青：《管弦乐配器法教程》，上海音乐学院作曲指挥系 1991 年 12 月版

6. 许洪范主编：《高等数学》，国防工业出版社 2005 年版

7. 上海交通大学物理教研室编：《大学物理学》，上海交通大学出版社 2006 年版

8. 郑英烈：《序列音乐写作基础》，上海音乐出版社 1999 年版

9. 彭志敏：《音乐分析基础教程》，人民音乐出版社 1997 年版

10. 姚恒璐：《现代音乐分析方法教程》，湖南文艺出版社 2003 年版

11. 伊凡·休伊特 (Ivan Hewtt)：《修补裂痕》，“音乐的现代性危机及后现代状况”，孙红杰译，杨燕迪校，华东师范大学出版社 2006 年版

12. 黄枕宇：《电子音乐与计算机音乐基础理论》，华文出版社 2005 年版

13. 马大猷：《声学手册》，科学出版社 1983 年版

14. 缪天瑞：《律学》，人民音乐出版社 2002 年版

15. 华天仞：《音乐声学大纲》，上海音乐学院教材

16. Barry Truax: *HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY*, Originally published by the World Soundscape Project, Simon Fraser University, and ARC Publications, 1978

17. Miller Puckette: *Theory and Techniques of Electronic Music*, DRAFT University of California, San Diego

18. Paul Masri: *COMPUTER MODELLING OF SOUNDFOR-TRANSFORMATION AND SYNTHESISOFMUSICAL SIGNALS* PDF downloaded from http: //www. fen. bris. ac. ukelecdm

19. Contemporary Music Review / volume 24 Number 2/3April/June 2005

(二) 论文类

1. Tristan Murail: *The Revolution of Complex* (translated by Tod Machover), Contemporary Music Review Vol. 24, No. 2/3, April/June 2005, pp. 121—135

2. Tristan Murail: *Sounds Spectra and Sprites* (translated by Tod Machover), Contemporary Music Review Vol. 24, No. 2/3, April/June 2005, pp. 137—147

3. Tristan Murail: *Target Practice* (translated by Joshua Cody), Contemporary Music Review Vol. 24, No. 2/3, April/June 2005, pp. 149—171

4. Tristan Murail: *Scelsi, De-composer* (translated by Robert Hasegawa), Contemporary Music Review Vol. 24. No. 2/3, April/June 2005. pp. 173—180

5. Tristan Murail: *Villeneuve-les-Avignon Conferences*, Centre Acanthes, 9—11 and 13 July 1992 (translated by Aaron Berkowitz & Joshua Fineberg), Contemporary Music Review Vol. 24, No. 2/3, April/June 2005, pp. 187—267

6. Tristan Murail: *After — thoughts*, Contemporary Music Revieiv 2000, Vol. 19, Part 3, pp. 1—3

7. Gerard Grisey: *Did You Say Spectral?* (Translated by Joshua Fineberg), Contemporary Music Revieiv 2000, Vol. 19, Part 3, pp. 1—3

8. David Bündle: *Gerard Grisey March*, 1996 issue of 20th-Century Music

9. P. A. Castanet: *Gerard Grisey and the Foliation of Time* (Translated by Joshua Fineberg), Contemporary Music Revieiv 2000, Vol. 19, Part 3, pp. 29—40

10. Jonathan Harvey: *Spectralism*, Contemporary Music Revieiv 2000, Vol. 19, Part 3, pp. 11—14

11. Damien Pousset: *The Works of Kaija Saariaho, Philippe Hurel and*

Marc—Andre Dalbavie—Stile Concertato, *Stile Concitato*, *Stile Rappresentativo*, Contemporary Music Review2000, Vol. 19, Pan 3, p. fv67—l 10

12. *Outgrowth of timbre and rhythm*

13. *Visualization of Multi—Part Music* (Acoustics and Perception), Werner A. Franz Födermayr http: //www. kfs. oeaw. ac. at/fsf/mus/Poly1. htm

14. Iannis Xenakis: *Persepolis*, World Wide Web www. fractal-records. com

15. James Harley: *The Electroacoustic Music of Iannis Xenakis*, Minnesota State University Moorhead 1104 7th Avenue South Moorhead, Minnesota 56563, USA harleyja@mnstate. edu

16. Gerard Pape: *Iannis Xenakis and the "real" of Musical Composition*, 62 rue Michel—Aye75016 Paris, France 100422. 1771@compuserve. com, Computer Music Journal

17. *Morton Feldman and Iannis Xenakis In conversation*, Edited by Vincent Gasseling and Michael Nieuwenhuizen

18. ComputerMusic: *Analogue synthesis for beginners*, *The CM Guide to FM Synthesis*

19. Sound on Sound: *Synth secrets*, *Sound in a nutshell—Granular Synthesis*, *real-time granular synthesis*

20. Brian Kane: That Elusive "*Elementary Atom of Music*" (未发表)

21. S. A. Van Duyne; J. O. Smith. 1996. *The 3D tetrahedral digital waveguide mesh with musical applications*in Proc. International Computer Music Conference (ICMC). pp. 9—16

22. P. Masri; A. Bateman. 1996, *Improved modelling of attack transients in music analysisresynthesis*, in Proc. International Computer Music Conference (ICMC). pp. 100—103

23. D. Phillips; A. Purvis; S. Johnson. 1996. *Multirate additive synthesis* in Proc. International Computer Music Conference (ICMC). pp. 496—499

24. Marc Lebrun: *A derivation of the spectrum of fm with a complex modulating wave*, Computer Music Journal, 1 (4): 51 {52, 1977

25. *Open Music* explain

26. 沈叶的硕士学位论文《音色分析的前提与分析模型的建立》，上海

音乐学院图书馆，学校代码：10278，学号：M01—12

（三）总谱类

Gérard Grisey（1946—1998）

1.《起源》（*Derives*，1973—1974），Paris：Editions Ricordi

2.《分音》（*Partiels*，1975），Paris：Editions Ricordi

3.《调制》（*Modulations*，1976—1977），Paris：Editions Ricordi

4.《时间的漩涡 I、II、III》Vortex Temporum I—II—III（1994/1996），Paris：Editions Ricordi

Tristan Murail（1947—　）

5.《忆/蚀》（*Memoire/ Erosion*，1975/1976），Paris：Editions Transatlantiques

6.《花园秘密》（*C'est un jardin secret*，1976），Paris：Editions Transatlantiques

7.《遗忘的土地》（*Territoires de I'oubli*，1976/1977），Paris：Editions Transatlantiques

8.《夕阳的十三种颜色》（*Treize couleurs du soleil couchant*，1978）. Paris：Editions Transatlantiques

9.《太空》（*Ethers*，1978），Paris：Editions Transatlantiques

10.《空间激流》（*Les Courants de I'Espace*，1979），Paris：Editions Transatlantiques

11.《龚德沃呐》（*Gondwana*，1980），Paris：Editions Transatlantiques

12.《瓦解》（*Disintegrations*，1982，commissioned by IRCAM），Paris：Editions Lemoine

13.《瞭望》（*Vues aeriennes*，1988），1230，Paris：Editions Lemoine

14.《寓言》（*Allegories*，1989/1990），Paris：Editions Lemoine

15.《瑟弘迪》（*Serendib*，1991/1992），Paris：Editions Lemoine

Kaija Saariaho（1952—　）

16.《无韵诗》（*Vers le blanc*，1982），Editions Wilhelm Hansen

17.《威伯林根》（*Verbleiiiiungen*，1982 /1984），Editions Wilhelm Hansen

18.《亭院秘密 I》（*Jardin secret I*，1985），《亭院秘密Ⅲ》（*Jardin secret* II，1986），《亭院秘密Ⅲ》（*jardin secret* III，1987），Editions Wilhelm Hansen

19.《晶》（*Du cristal*，1989—1990），Editions Wilhelm Hansen composed

20.《烟》(*a la fumee*，1990)，Editions Wilhelm Hansen

Hurel，Philippe（1955— ）

21.《形象》(*Pour I'image* ，1986—1987)，Gerard Billaudot Editeur，Paris

Dalbavie，Marc-André（1961— ）

22.《天堂机械》(*Les Paradis Mecaniques*，1982)，Editions Jobert，Paris

23.《王冠》(*Diademes*，1986)，Editions Jobert-Paris

24.《斯珂勒》(*Scuils*，1991)，Editions Jobert-Paris

Elliott Carter（1908—2012）

25.《双重协奏曲》(*Double Concerto*，1969)

引用卡特速率理论

Gyorgy Ligeti（1923—2006）

26.《分歧》(*Ramifications*，1968—1969)，Editions Sikorski

杨立青（1942—2013）

27.《悲歌》(为二胡与乐队，1991)，上海音乐学院出版社 2006 年版

28.《引子、吟腔与快板》(为二胡与乐队，1998)，上海音乐学院出版社 2006 年版

29.《荒漠暮色》(为中胡与交响乐队，1998)，人民音乐出版社 2007 年版

陈晓勇（1955— ）

30. *Duet for violin and zheng* für Ensemblemusik，1989 Editions Sikorski

31. *Diary* I. II. III（für Klavier，1996—2004）Editions Sikorski

32. *Floating Colours*，(2006) für Orchester Editions Sikorski

33. *Colours of Dreams*，(für Orchester，2008) Editions Sikorski

徐孟东（1955— ）

34.《远籁》(为大提琴与乐队，2010)，人民音乐出版社 2011 年版

徐仪（1963— ）

35.《虚实》(*Le plein du vide*，1997)

肖武雄（1963— ）

36.《第二交响乐》(博士学位作品，2007)

37.《佛光穹影》(大型室内乐，2006)，上海音乐学院委约作品

中国科学院声学研究所网

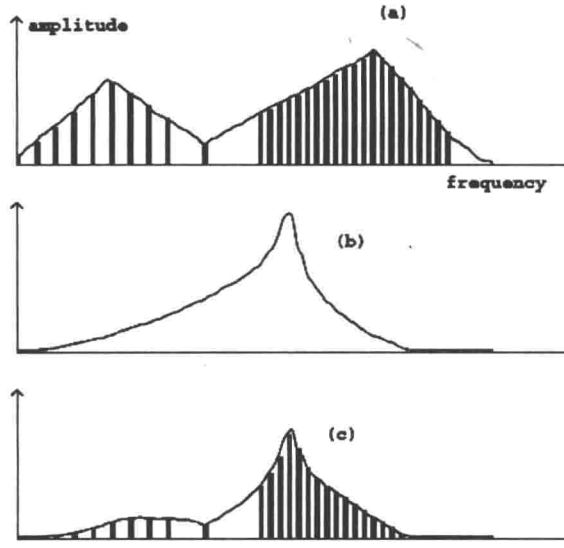
梧桐下网络：http：//www. wutongxia. com

http：//www. angelfire. com/music2/davidbundler/grisey. html

附录一 声音合成技术

1. 减法合成

减法合成示意图



图中（a）表示输入声音的原始频谱；（b）表示另一个声音的频谱图；（c）两者相消干涉（减法合成）以后的频谱图。

2. 振幅调制

通过调制振荡器来调制载波振荡器的振幅、相位，就称为“振幅调制”（Amplitude Modulation），简称 AM。

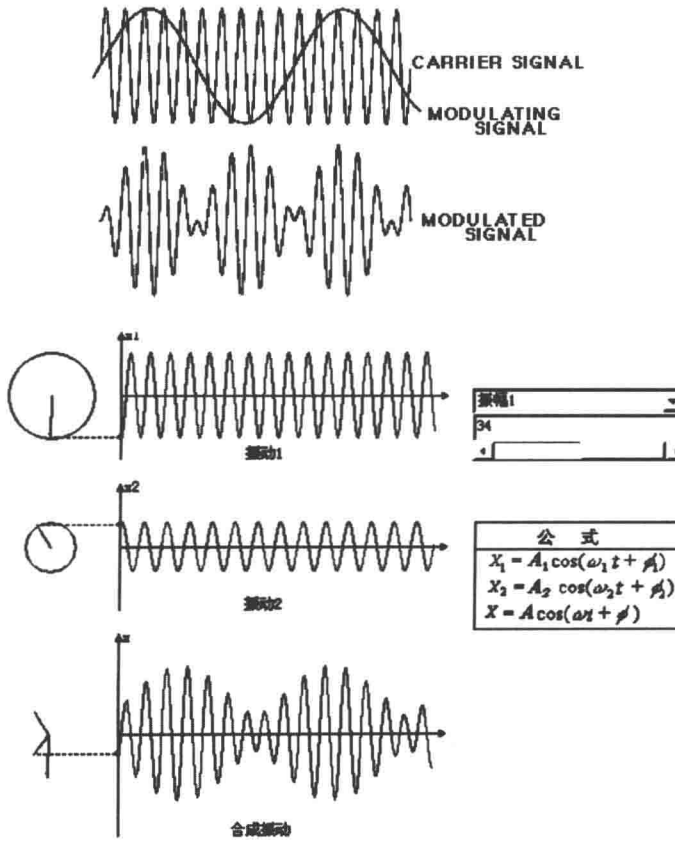
调制过程中还受调值指数的影响，调制指数称为 β 值（注意是拉丁字母 β，念作贝塔）。

β 定义为载波器扫过的频率（变化了的频率）与调制器的频率的比值，就是：

$$\beta=\frac{\Delta W_c}{W_m}$$

当调制指数为 0 时，表示没有调制，载波振荡器产生一个不变的正弦曲线振幅，当调制指数大于 0 时，载波体会带有一个正弦曲线的包络变化，如下图：

振幅调制演示图



A—振幅—角频率（或称“圆频率”）—初相

通过上面的图形，我们可以得到下列结论：

（1）调制体的频率影响载波体振幅的变化率（Rate）。

（2）调制体的振幅影响载波振幅的变化深度。

（3）调制体的波形（或音色）影响载波体振幅的波形变化。

振幅调制能在载波频率的两旁产生一对旁频（又称“边频”），可以用下面公式表示：

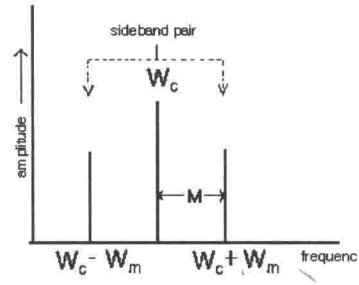
$$W_{sb} = W_c \pm W_m$$

W_{sb}是产生的边带频率（旁频），W_c 是载波器频率，W_m 是调制器频率。

调制频率在调制后所输出的声音中并没有出现，调制后的声音只有三种频率能量，即载波频率 W_c 和两个旁频（W_c+W_m）、（W_c-W_m），而且

旁频的振幅只是载波振幅的一半。参见下图：

振幅调制旁频图



根据调制波不通过最后的输出这一特点，利用一个非正弦波（有多个谐波分量）来调制正弦的载波，就可以对载波进行连续的调制，从而生成更加丰富的输出频谱。下面我们假设载波为 100Hz 的正弦波，调制波为含有三个谐波的非正弦波，分别是 750Hz、1,500Hz 和 2,250Hz，把它们分别带入旁频公式可以得到下列输出频率表格。

输入	输出
载波频率：1,000Hz	1,000Hz
调制波频率：750Hz	250Hz　1,750Hz
调制第二谐波频率：1,500Hz	500Hz　2,500Hz
调制第三谐波频率：2,250Hz	1,250Hz　3,250Hz

如果载波与调制波都为非正弦波，输出的频率就将更加复杂，旁频产生得更加丰富。

3. 环形调制

环形调制是振幅调制的一个特殊情况，当调制技术直接作用于载波器的振幅输入时，这种调制称为“环形调制”。大部分的环形调制都是 AC-coupled 式的，这意味着在调制之前，DC（直流）偏移将被消除掉，但载波器和调制器的自身的频率也无法输出了。这是与振幅调制最大的区别，振幅调制，当调制频率为 0 时，载波频率可以输出。环形调制的输出有两个重要的特征：

（1）输出的声音具有偏离、扭曲，为不协和音。

（2）如果两个输入（载波、调制波）中任何一个是处在零音量上，输出也同样是零，即没有输出，这好比收音机上加了一个闭合非常好的开关。

其余因素工作原理都与振幅调制（AM）一样。

4. 频率调制（FM）

在电子音乐合成技术中，频率调制是最有效的合成技术之一，它最早由美国斯坦福大学约翰·卓宁（John Chowning）博士提出。20 世纪 60 年代，卓宁在斯坦福大学开始尝试使用不同类型的颤音，他发现当调制信号的频率增加并超越某个点的时候，颤音效果就在调制过的声音里消失了，取而代之的是一个新的更加复杂的声音。

今天看来，卓宁当时只是在完成无线电广播发射中最常用的调频技术（也就是 FM 广播）。但卓宁的偶然发现，却使这种传统的调频技术在声音合成方面有了新的用武之地。当卓宁领悟了 FM 调制的基本原理后，他立即开始着手研究 FM 理论合成技术，并在 1966 年成为使用 FM 技术制作音乐的第一人。之后卓宁通过斯坦福大学的授权，寻找美国的制造商，看他们对这种全新的合成技术是否有兴趣。遗憾的是，没有一个美国制造商看出 FM 的潜力。正在卓宁绝望的时候，斯坦福大学找到了雅马哈，最终把技术转变为成果，在 20 世纪 80 年代初生产出世界上首个 FM 技术的合成器（DX1），随后带起世界旋风，使得 YAMAHA 公司取得了巨大的成功，向全世界销售了数百万台的 FM 合成器、风琴和键盘，其中最有名的就是 DX1 和 DX7。

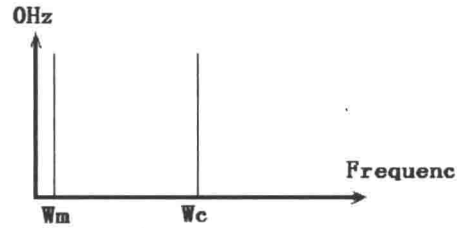
YAMAHA 的 DX7 合成器（下图）在 80 年代中期出现的时候，它马上就在乐器史上占据了自己不可替代的地位，因为它是运用 FM（Frequency Modulation，频率调制）技术来创造声音的最为成功的合成器。

实际上 FM 看起来并不新奇，无非是将模拟合成器里的振荡器、滤波器、截止频率和共鸣用什么运算器（operators）、载波器（carriers）、调制器（modulators）取代了。FM 合成的原理实际上也非常简单，但是它不

同于采样和我们经常用到的模拟合成器，模拟合成器使用 LFO（低频振荡器）来调制音色，而 FM 合成器在创造音色时载波器先产生一个最简单的波形，比如说正弦波，之后再加上一个正弦波用来调制最先产生的那个正弦波。比如可以改变它的音量包络，或为它增加更多的谐波，达到调制音色的目的。

卓宁发现 FM 就像 AM 一样都会发生边带，也就是波形额外的部分，在输出信号的频率光谱上和载波器、调制器的频率完全没有关系。我们来看看 FM 是如何产生边带的。假设我们有一个正弦波的载波器，频率为 Wc，还有一个频率为 Wm 的调制器，见下图：

一个载波和一个调制波

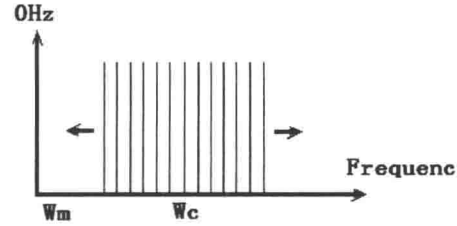


与 AM 只发生两侧的边带（Wc＋Wm）和（Wc－Wm）所不同的是，FM 产生了一系列的边带，可以表示为下列等式：

$$W_{sb}=W_c\pm W_m$$

W_{sb}是 FM 产生的边带频率，即旁频。实际上 W_{sb}是一系列的数，因为 n 可以取任意的整数（0、1、2、3、4……）。每个边带平均分布在 W_c（载波器频率）的两侧，分别是 W_m（调制器频率）的任意整数倍。可以看到是调制器决定了边界的产生位置。理论上说 n 可以取无限的整数，也就是当调制器对一个载波器进行调制时会产生无穷级数的边带，但是在实际应用中不可能有能够产生无穷级数的设备，所以边带的值都被制造商限制在他们认为有意义的数里面了。下图形象地表示了边带的发生。

频率调制边带（旁频）的位置



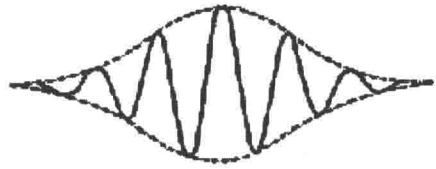
我们再引入一个新的概念，就是载波器频率与调制器频率的比值 Ratio，

载波器是 Carrier，调制器是 Modulator，所以我们简称为 C：M 比率。这个理解起来很简单，比如载波器是 100Hz，调制器是 200Hz，那么 C：M 比率就是 1：2。我们把它们带入边带公式，不管载波器的频率是多少，向上排列的边带就是 C+M、C+2M、C+3M、C+4M……向下排列的边带就是 C−M、C−2M、C−3M、C−4M……

假设 C：M 比率是 1：1，那么也就是说载波器是 1，向上的边带分别是 2、3、4……向下的边带就是 0、−1、−2、−3、−4……我们给一个具体的数值，比如载波器和调制器都是 100Hz（C：M 比率就是 1：1），向上的边带就是 200Hz、300Hz、400Hz……这就是一个理想的 100Hz 的波形的谐波级数，换句话说，1：1 的 C：M 比率产生了一个谐波级数不管载波器的频率是多少。

5. 粒子、物理模仿及波塑合成

（1）粒子合成器——坚果壳中的声音



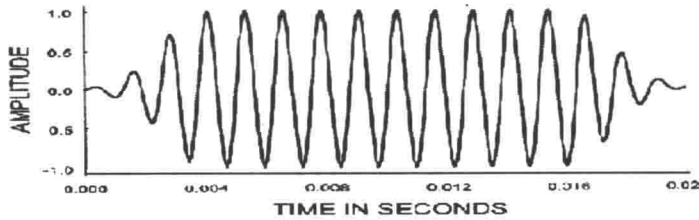
粒子合成（Granular Synthesis）的声音合成方法越来越多地出现在现今的软件合成器中，何谓粒子？粒子合成又是怎样的？以下做一个简单解释。现成的一个声音，将被切碎成成千上万的部分，每个部分就叫做一个微粒（grain），粒子合成也就因此而得名，再使用这些微粒进行重新排列组合和处理，就得到了新的声音，这便是粒子合成的大致过程。

这种使用无数微粒合成声音的方法可以追溯到 1947 年，一个叫做 Denis Gabor 的物理学家在《自然》（*Nature*）杂志发表了一篇名为《声学量子与听觉理论》（*Acoustic Quanta and the Theory of Hearing*）的论文，在那之后粒子合成有了众多的追随者，其中著名的有 Iannis Xenakis，Curtis Roads（最先将离子合成与电脑结合起来的人），Barry Truax。

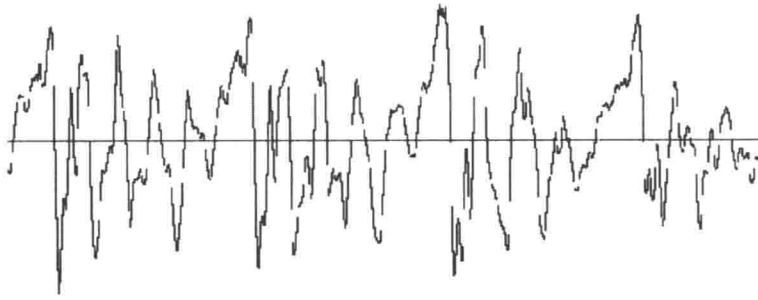
那为什么粒子合成在近两年才流行起来呢？按照粒子合成的原理，你不仅可以改变那些成千上万的微粒的音色、长度、音高、频率，还可以将他们按不同顺序再重新排列组合起来。由于可调参数众多，而粒子数量更是多得离谱，在电脑技术和速度都很低的 50 年代，实现起来有很大的难度。所以粒子合成直到 90 年代才“死灰复燃”了，可见理论永远走在成品的前面。粒子合成，就像坚果壳中的声音！坚果壳由两个部分组成，果壳

和壳中的果肉。在粒子合成中，果壳就是声音包络，而果肉就是组成声音的波形。单独的声音微粒也许看不出什么，但成千上万的微粒组成一个完整声音的时候，“果壳”和“果肉”将决定这个声音的最终形态。首先来看“果肉”——微粒的波形，微粒的“果肉”可以由任何波形构成，最简单的波形就是正弦波了，其也是最纯净的波形，不含有任何谐波，但在粒子合成中，最纯净的正弦波并不适于创造出非常棒的声音，但因为其波形简单，便于理解，所以我们还是使用正弦波为例子。

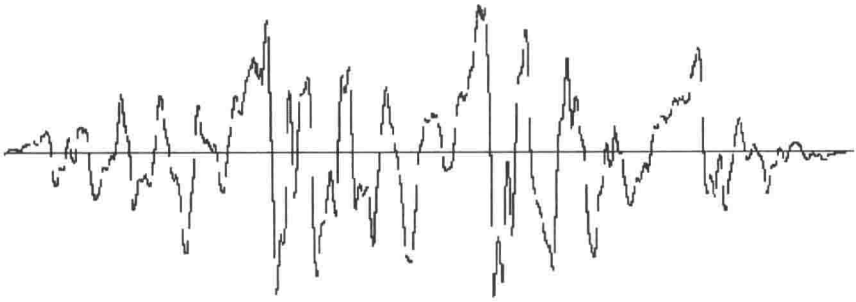
你可以定义正弦波的频率（也就是每秒钟振荡的次数），但因为正弦波是无限延伸的，所以在一般的合成器上无法定义其震荡的时间长度，而粒子合成就可以做到这一点，不过被限定时间长度的正弦波在这里就不叫正弦波了，而被称为“正弦微粒”。下图为一个正弦微粒，其时间被限定为 0.020 秒，而两端的振幅都被衰减了，看起来像一个坚果壳。



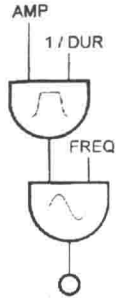
不仅是简单的正弦波形，采样音色也可以作为微粒使用。采样音色的长度将被拉伸或压缩到你需要的微粒长度，而且是只改变采样音色的长度而音高保持不变。在粒子合成中有两类采样音色：长采样和短采样，它们在粒子合成中的使用方法是不同的。短采样的长度可以直接当作一个微粒来使用，而长采样可以被切割成多达一系列的微粒使用，当然你可以只使用其中某几个微粒。下图为一个采样音色：



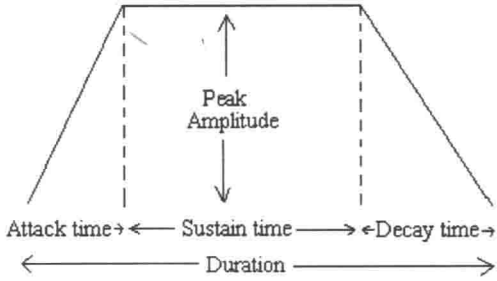
下图为此采样音色被作为微粒使用，两端的振幅都被衰减了，大体看起来像一个坚果壳。



再来了解“果壳”——微粒的包络，“果壳”决定了微粒的长度和振幅。为微粒加包络的处理方法叫做“开窗术”（windowing，是一种振幅调制的技术），其方法如下图所示。我们不是声音工程师没必要了解如何加包络，所以下图的内容也不必理会，我们需要了解的是微粒的包络是怎样的。



微粒的包络不是我们熟悉的 ADSR（Attack-Decay-Sustain-Release），而包含了更为丰富的内容：Attack（起奏）、Sustain（保持）、Decay（衰减）、Amplitude（振幅）、Duration（持续时间），下图为一个微粒的包络。



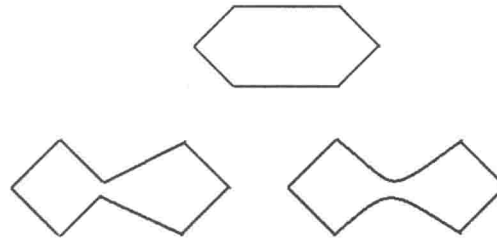
Duration（持续时间）：其决定了一个微粒的持续时间，一般来说，10—50 毫秒是最佳时间长度。如果微粒的持续时间较短，其会占用更多的频谱带宽而带来噪音，使得声音浑浊不清。

Amplitude（振幅）：振幅决定着微粒的音量，最大只能到100%，也就是说微粒的声音不能变大，只能按比例减小。

Attack（起奏）：起奏时间决定着微粒从最开始到最大音量持续的时间长短，很短的起奏时间会带来噪音，还有一些边带频谱，这都是我们不希望得到的。

Sustain（保持）：保持时间决定着在起奏之后，微粒在最大振幅停留的时间。如果微粒的 Duration 时间很长，而 Sustain 时间很短，就会产生一些噪音。一般来说，在粒子合成中不能调整 Sustain 的时间，其长短是由 duration-attack-decay 得出的。

Decay（衰减）：衰减时间决定了微粒由最大振幅到无声的时间，在粒子合成中 Decay 的时间与 Attack 时间可以不相同（也就是说，果壳的两头不一定是一样尖的），但是不同的 attack 和 decay 会带来噪音和频谱的边带，所以一般情况下果壳的两头还是一样尖的。见下图：



可见微粒包络中的振幅，可以是直线，也可以是带有拐点的直线，甚至可以是曲线！

那么这些成千上万的微粒是如何组合在一起形成最后的声音的呢？

方法有二：同步和异步。首先看同步的粒子合成：

使用同步的粒子合成方法，所有的微粒的时间长度都是相同的，或者是一种线性递增/递减的关系。同步的粒子合成可以分别调节每个微粒的 Amplitude（振幅）、Grain Density（微粒密度）、Pitch（音高）、Inter-onset time（开始时间）。Grain Density（微粒密度）是离子合成器中比较重要的一个参数，其决定了微粒的分布，以每秒内的微粒数量为单位。每秒低于30个微粒就算是低密度了，这样做可以使最后发出的声音带有一些节奏感。就像说哎——呦——啊（长音连读），在低密度情况下，就成了哎（停）哎（停）呦（停）呦（停）啊（停）啊（停），中间加入了小段的停顿，带来一些节奏的感觉。随着密度的增大，声音频谱就会越复杂，声音的振幅（也就是音量）也会越大，音高会变高。

密度与微粒持续时间之间的关系也会带来声音的变化，单个微粒的持续时间越短，微粒密度越大，那么声音产生的重叠就越多。Inter-onset time（开始时间）决定了两个临近微粒间的持续时间，这个参数不能自己定义，而是使用密度计算出来的。再来看异步的粒子合成：

使用异步的粒子合成方法，所有微粒都是随机截取的，他们之间的时间关系不像同步粒子合成那样是线性的，而是完全没有规律的。但其可调参数与同步粒子合成是相同的，包含了 Amplitude（振幅）、Grain Density（微粒密度）、Pitch（音高）、Inter-onset time（开始时间）。Grain Density（微粒密度）参数同样是以每秒内的微粒数量为单位。在同步粒子合成中 200 微粒/秒表示在一秒的时间内平均截取 200 个微粒，密度越大音高越高。而在异步粒子合成中，这 200 个微粒是随机截取的，密度与音高没有任何关系。不管是同步还是异步，所有微粒最后都是按照截取的顺序来排列的，这样才能形成与原采样类似的声音。当然，如果是直接使用粒子合成新的声音而不是改造采样音色，那么微粒的顺序也可以随机排列。

修整所有微粒组成的声音：

打个比方，每个微粒就好比大树的每片叶子，叶子的形状、颜色都决定了整棵树的外观，不同的叶子代表了不同的树。而微粒组成的整个音色就好比由所有叶子组成的整棵大树，园丁在修剪树木时不是修剪每片叶子（如果是这样，园丁早就累死了），而是对整棵树的形状、长势做修整。在粒子合成中，我们可以对单个微粒做细致的修改，当然也可以对所有微粒组成的整个声音做修改。我们可以使用几乎所有合成方法来为所有微粒组成的整个声音做修改，在不同的粒子合成器中使用的方法也都不同，这里就不列举了。

粒子合成的概念简单地说就是将一个采样音色分为成千上万个的微粒，每个微粒的包络都是可调的，而截取微粒的时间长度、密度也是可调的，截取之后再按照原来的顺序拼接在一起，形成新的声音。当然你也可以使用各种波形比如正弦波、锯齿波、脉冲波组成成千上万个微粒，通过改变包络，和一些上面讲到的参数，组成全新的充满个性的声音。

（2）物理模仿合成（Physical Modelling）

从声音的自然物理属性上研究声音。从声学基础的三个要素出发：

音调发生器（发音体）(tone generation) →音调形态（连接体）(tone shaping) →音量形态（共鸣体）(volume shaping) 去模拟合成声音。

（3）波形表合成技术

为改变 FM 合成乐音的不足，人们对真实乐器发出的声音进行采样

后，将数字音频信号存储在 ROM 芯片或者是硬盘中（称其为波形表，又称前者为硬波表，后者为软波表），进行合成时再将相应乐器的波形记录播放出来，这就是波形表合成技术。显然这种方法可以产生更加丰富逼真的音乐。但和波形文件一样，它需要大量的存储空间（通常要有 2－4M）来记录真实乐音，因此一般同时要采用数据压缩技术。

带波形表合成的芯片一般也能完成 FM 合成的所有功能，这主要是为了兼容原有的合成芯片，如 Yamaha 公司的 OPL－4 就是该类芯片。使用软件波形表时一般要随声音卡提供存有波形表的软盘（或光盘），在使用前要将波形表安装到硬盘中。

许多的声音卡如 Sound Blaster（声霸卡）都配备了音乐创作和演奏软件，提供 FM 音乐驱动程序，并可利用文字编辑器写成类似简谱格式的文件，然后生成 FM 音乐文件。也可以通过格式转换，把其他格式（如 MIDI）音乐文件转换成 FM 音乐文件。

（4）波塑型合成（Waveshaping）

波塑型合成是计算机音乐中非常流行的合成技术，它使某些简单的音频信号变成很复杂的音频信号。作为一种变形技术，波塑型合成能够实现有各种参数的动态演化的频谱。拿一个最简单的正弦波为例，通过改变这个正弦波的形（Shape），可以将这个只有一个谐波的声音信号变成一个谐波丰富的声音信号。

波塑型合成在实现复杂音色上，比加法合成技术带有更多的计算化特性，这一点与频率调制（FM）技术一致，波塑型往往借助一个指数，通过这个指数的时间变化促成频谱的动态变化，从而提供持续的频谱控制。而与 FM 技术不一致的是，波塑型提供一种可能性，这种可能性可以使其拥有可指性最大泛音数的带限频谱。这种带限频谱是通过波塑型来改变声音振幅实现的。

上述内容参考了下列杂志论文：

Computer Music：*Analogue synthesis for beginners*，The CM Guide to FM Synthesis.

Sound on Sound：*Synth secrets*，Sound in a nutshell—Granular Synthesis，real-time granular synthesis.

附录二 相关计算公式

周期信号傅立叶级数展开

一、二角形式傅立叶级数：

周期信号 $f(t)=f(t+nT)$，满足狄氏条件时，可展成：

$$f(t)=a_0+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n cos n\Omega t+b_n sin n\Omega t) \quad \Omega=\left(\frac{2\pi}{T}\right)$$

其中：$a_0=\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}f(t)\,dt$ 直流分量

$a_n=\frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}f(t)\,cos n\Omega t dt$ 余弦分量幅度

$b_n=\frac{2}{T}\int_{t_0}^{t_0+T}f(t)\,sin n\Omega t dt$ 正弦分量幅度

二、傅立叶变换的基本性质

$f_1(t)\Rightarrow F_1(j\omega)$ $f_2(t)\Rightarrow F_2(j\omega)$

线性性质 $af_1(t)+bf_2(t)\Rightarrow aF_1(j\omega)+bF_2(j\omega)$

折叠性 $f(-t)\Rightarrow F(-j\omega)$ 频域微分性 $(-jt)f(t)\Rightarrow\frac{dF(j\omega)}{d\omega}$

对称性 $F(jt)=2\pi f(-\omega)$ 频域积分性 $\pi f(0)\delta(t)+\frac{f(t)}{(-jt)}\Rightarrow\int_{-\infty}^{\omega}F(j\omega)\,dx$

时频展缩性 $f(at)\Rightarrow\frac{1}{|a|}F\left(j\frac{\omega}{a}\right)$

时移性 $f(t\pm t_0)\Rightarrow F(j\omega)\,e^{\pm j\omega t_0}$ 时域卷积定理 $f_1(t)*f_2(t)\Rightarrow F_1(j\omega)F_2(j\omega)$

频移性 $f(t)\,e^{\pm j\omega t_0}\Rightarrow F[j(\omega\mu\omega_0)]$ 频域卷积定理 $f_1(t)f_2(t)\Rightarrow\frac{1}{2\pi}F_1(j\omega)*F_2(j\omega)$

时域微分性 $\frac{df(t)}{dt}\Rightarrow j\omega F(j\omega)$ 帕塞瓦尔定理 $\int_{-\infty}^{\infty}f_1(t)\overset{+}{f}_2(t)\,dt=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}F_1(j\omega)\overset{+}{F}_2(j\omega)\,d\omega$

时域积分性 $\int_{-\infty}^{t}f(x)\,dx\Rightarrow\pi F(0)\delta(\omega)+\frac{F(j\omega)}{j\omega}$

附录三 实验数据

傅立叶分析

一、小提琴、口哨及钢琴不同音调的谐波振幅数据表

	谐波分量								
波形	1*	2	3	4	5	6	7	8	9
小提琴	100	0	33	0	20	0	14	0	11
口哨	100	0	11	0	4	0	2	0	1.2
钢琴	100	50	33	25	20	17	14	12.5	11

* 基本波形（440Hz）

二、不同波形谐波分量

	谐波分量								
波形	1*	2	3	4	5	6	7	8	9
方波	100 (0°)	0	33 (180°)	0	20 (0°)	0	14 (180°)	0	11 (0°)
三角波	100 (0°)	0	11 (0°)	0	4 (0°)	0	2 (0°)	0	1.2 (0°)
锯齿波	100 (90°)	50 (270°)	33 (90°)	25 (270°)	20 (90°)	17 (270°)	14 (90°)	12.5 (270°)	11 (90°)
正弦波	100 (0°)	33 (180°)	8.3 (0°)	4.8 (180°)	3.3 (0°)	2.1 (180°)	1.3 (0°)	1.2 (180°)	0.9 (0°)
抛物线	100 (0°)	25 (0°)	11 (0°)	6.7 (0°)	4 (0°)	3 (0°)	2 (0°)	1.5 (0°)	1.2 (0°)

表格中，其振幅是用百分比表示，括号中的角度表示移相的大小。

附录四　交响乐器频谱图

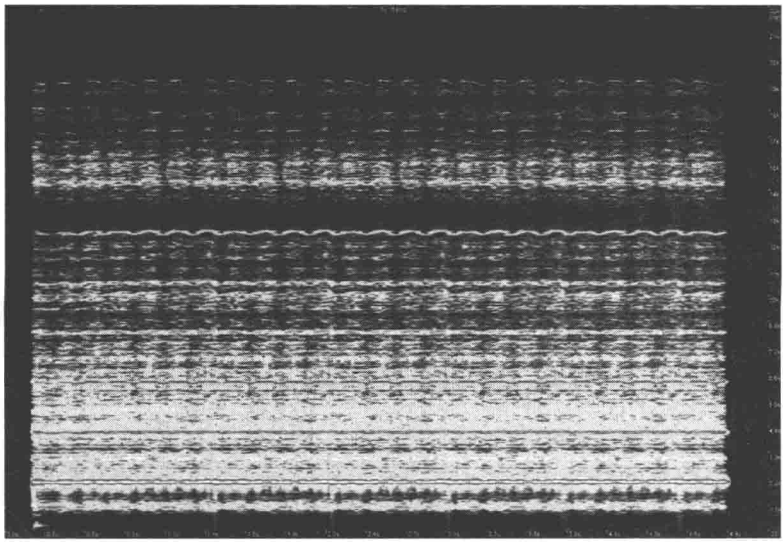


图 1A　短笛 c^3 频谱

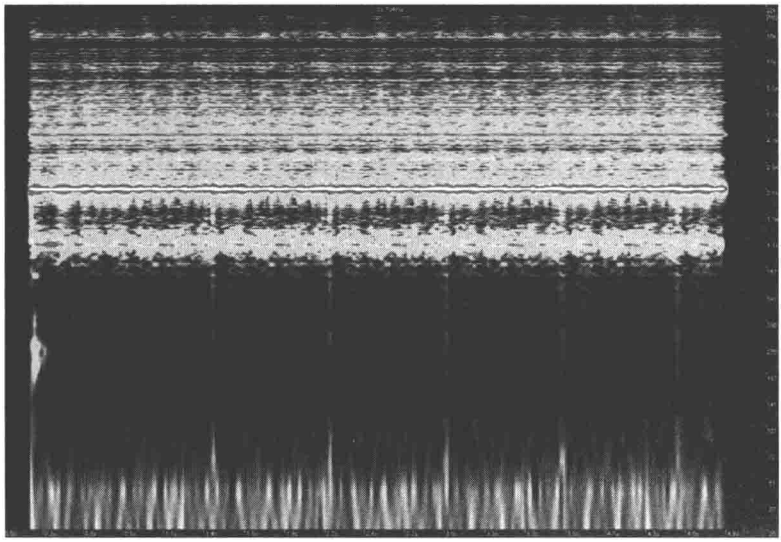


图 1B　基频放大

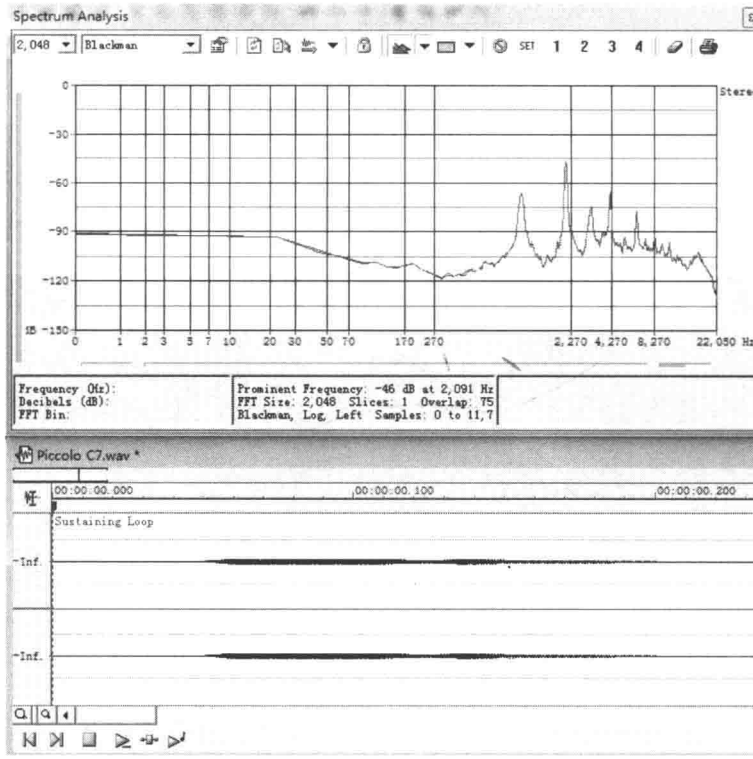


图 1C 短笛 c^3 波形

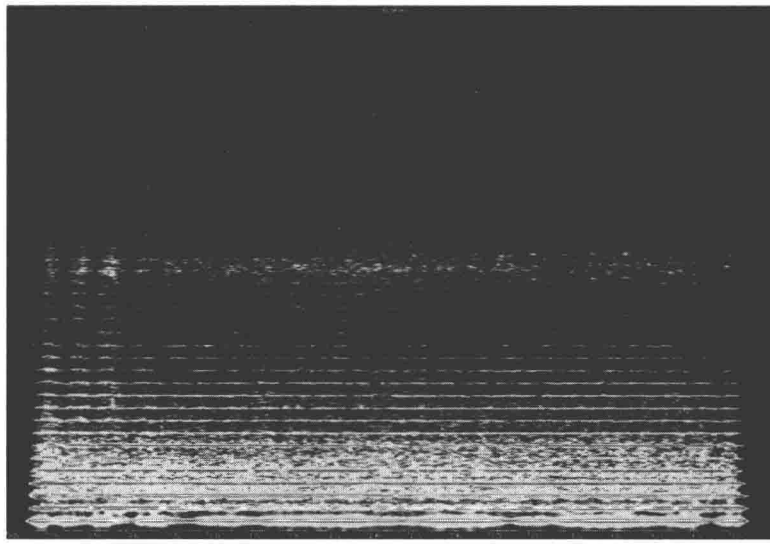


图 2A 长笛 c^2 频谱

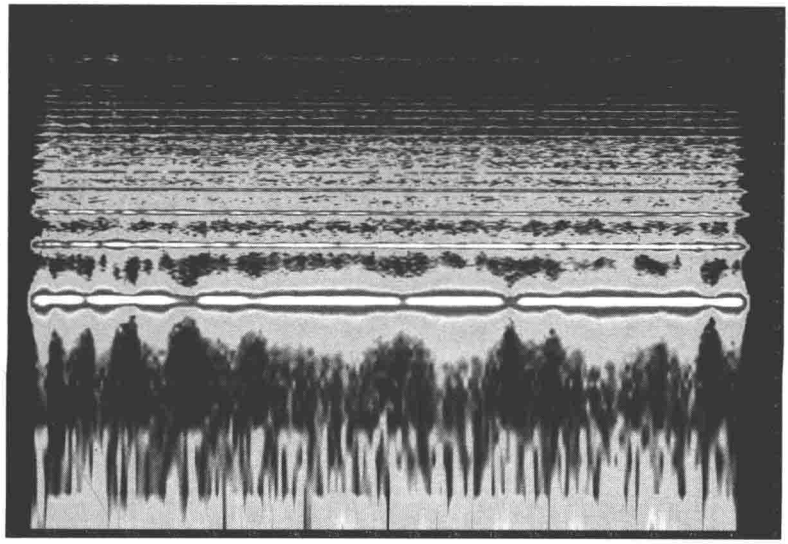


图 2B 基频放大

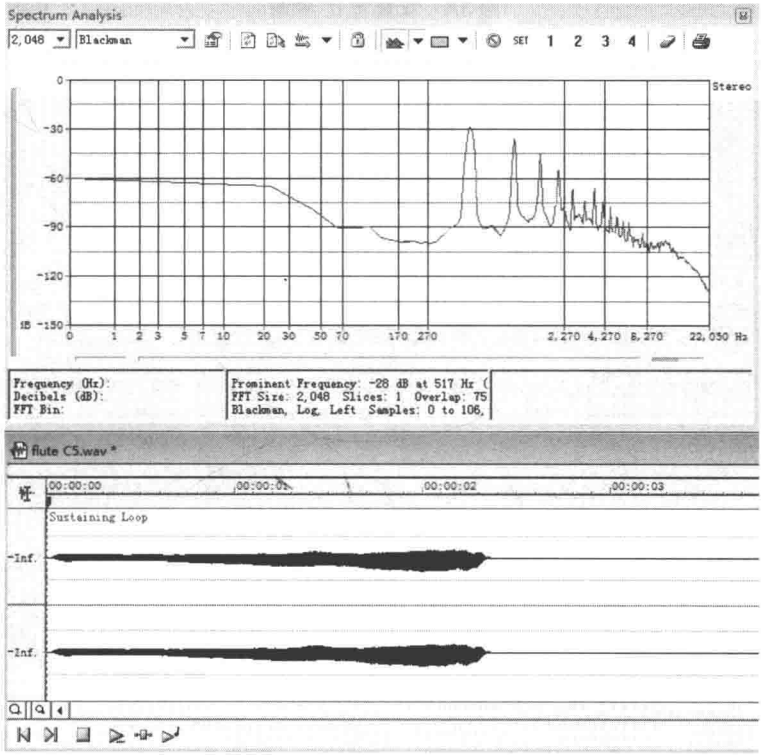


图 2C 长笛 c^2 波形

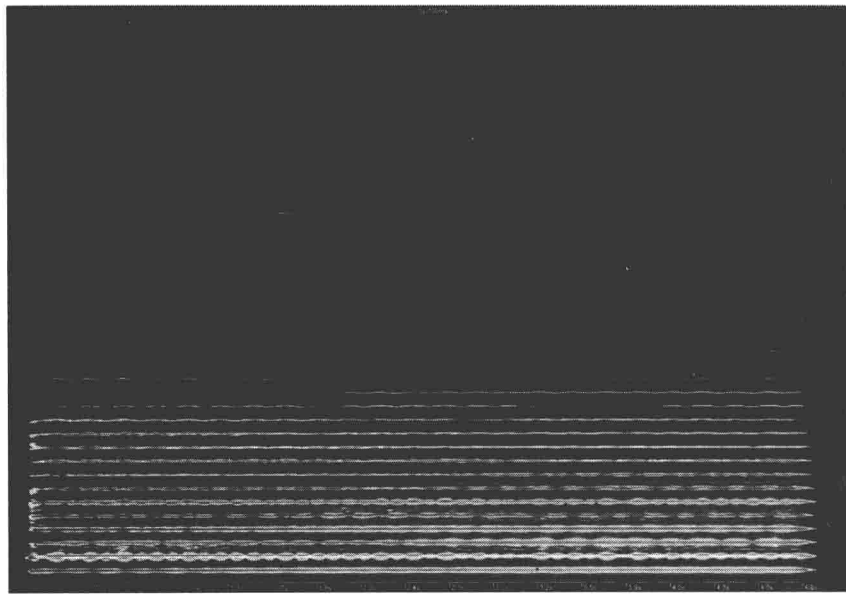


图 3A 双簧管 c^2 频谱

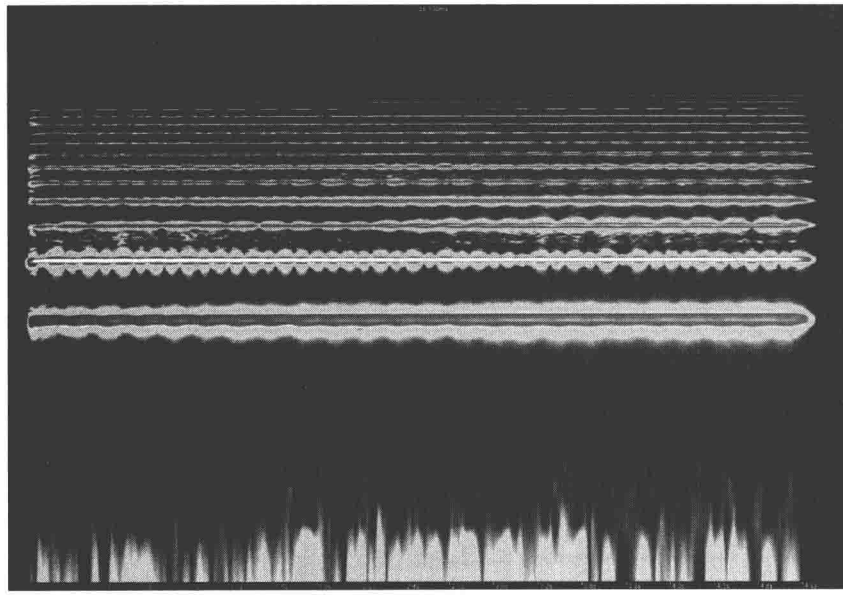


图 3B 基频放大

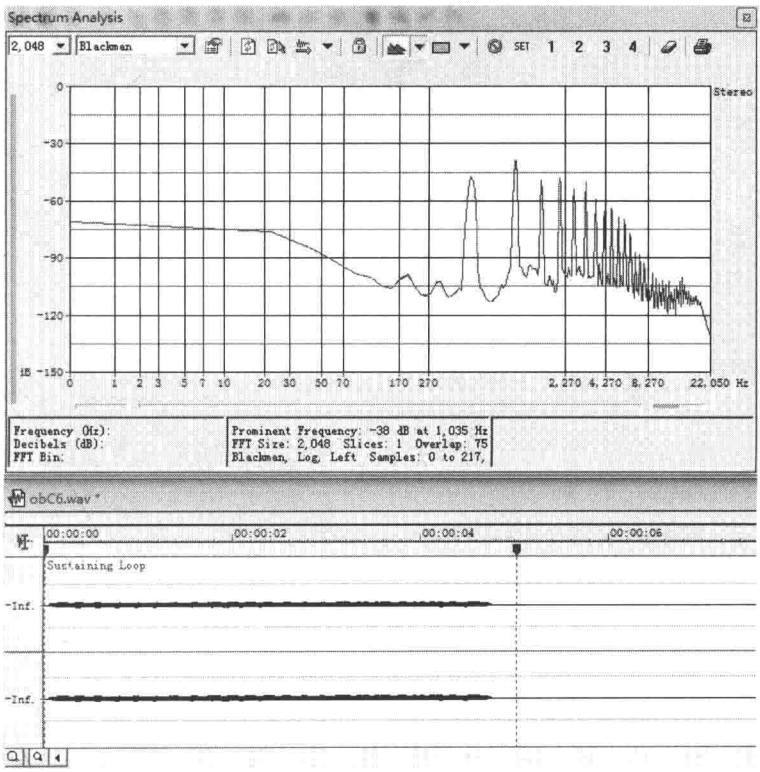


图 3C 双簧管 c^2 波形

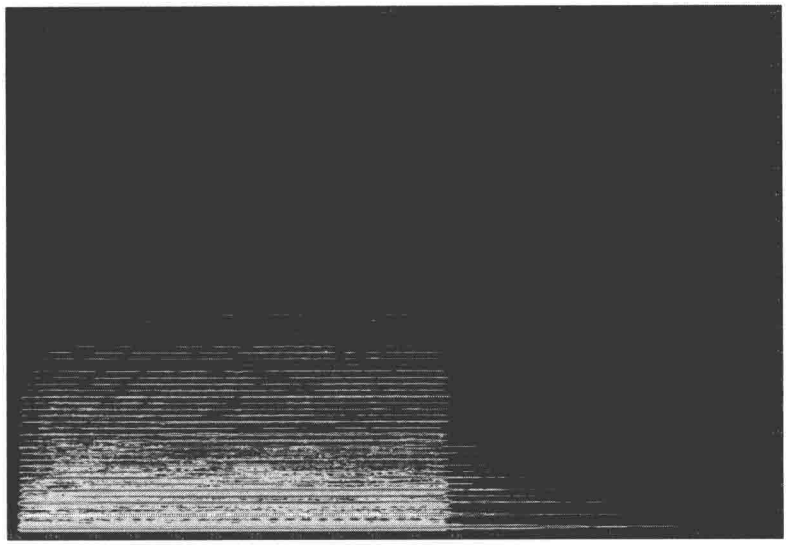


图 4A 单簧管 c^2 频谱

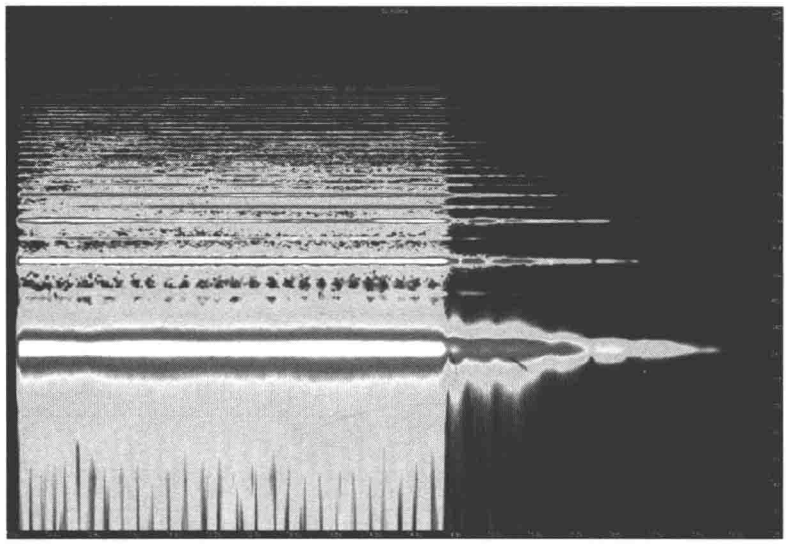


图 4B 基频放大

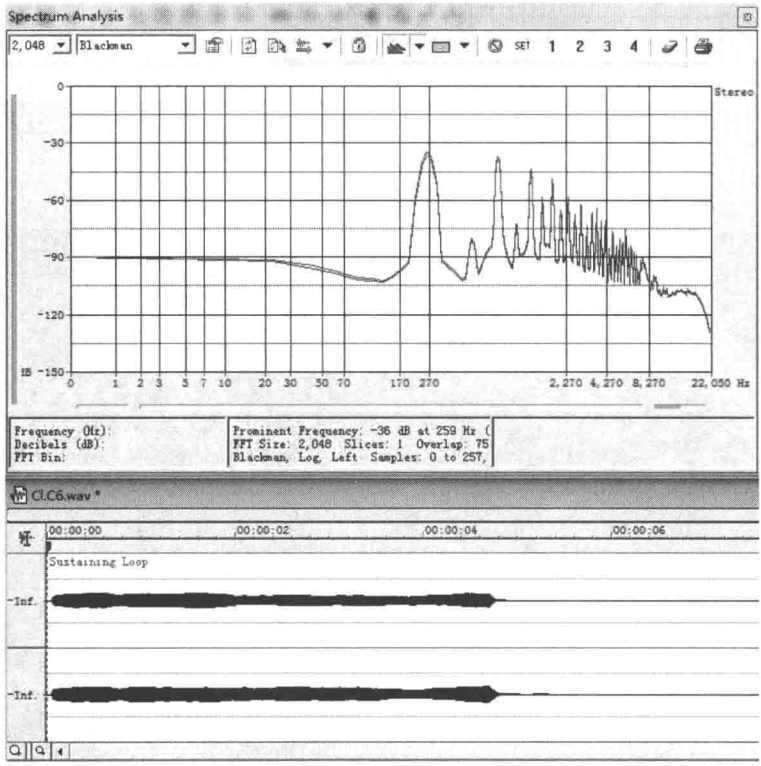


图 4C 单簧管 c^2 波形

图 5A 大管 c 频谱

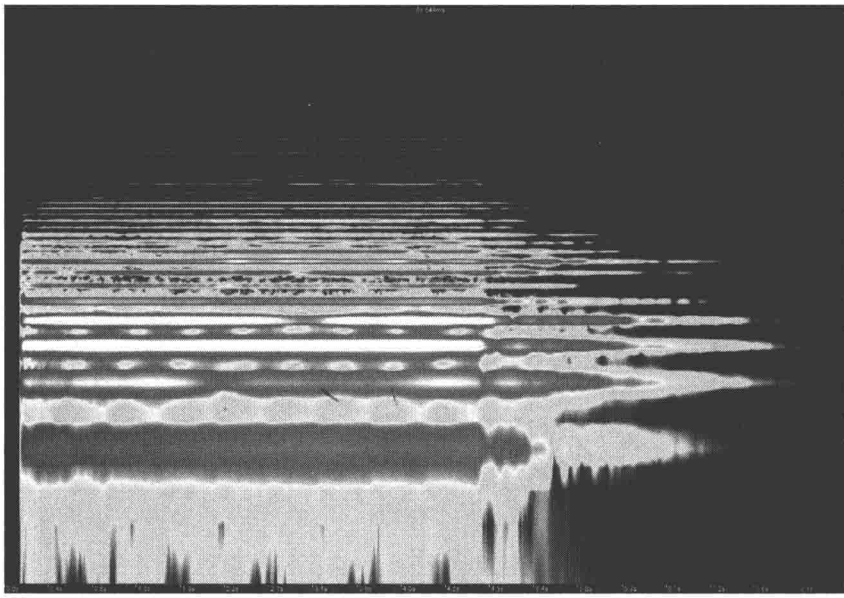


图 5B 基频放大

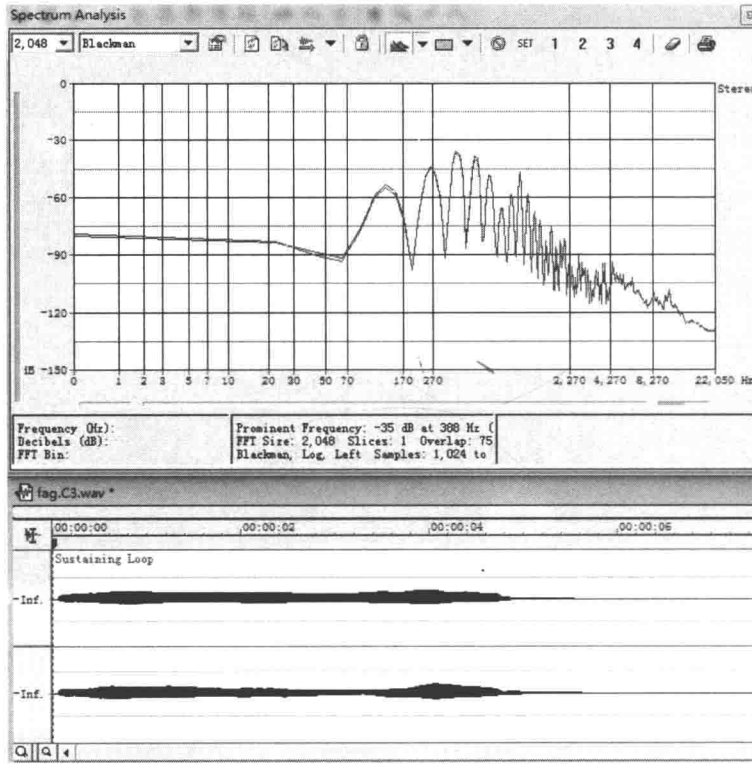


图 5C 大管 c 波形

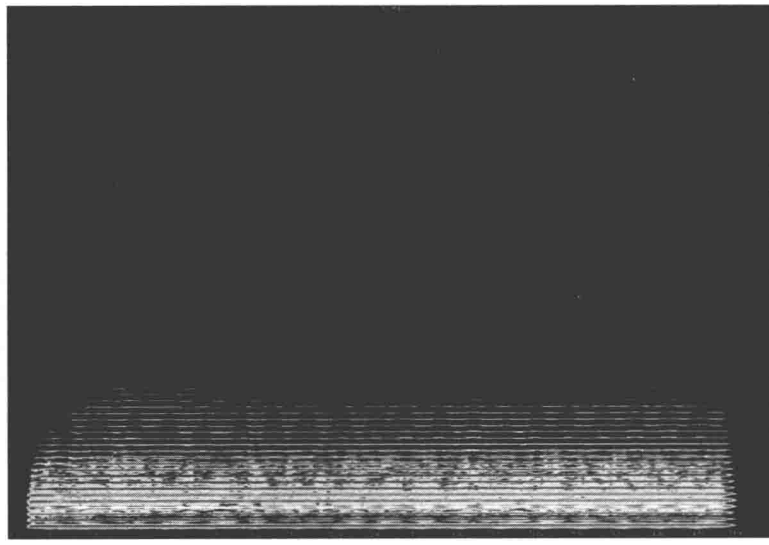


图 6A C 调高音小号 c^1 频谱

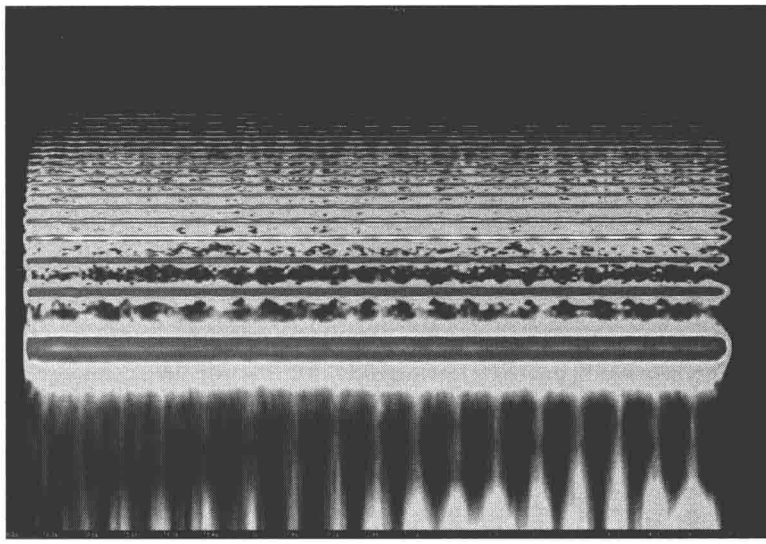


图 6B 单吐直吹·基频放大

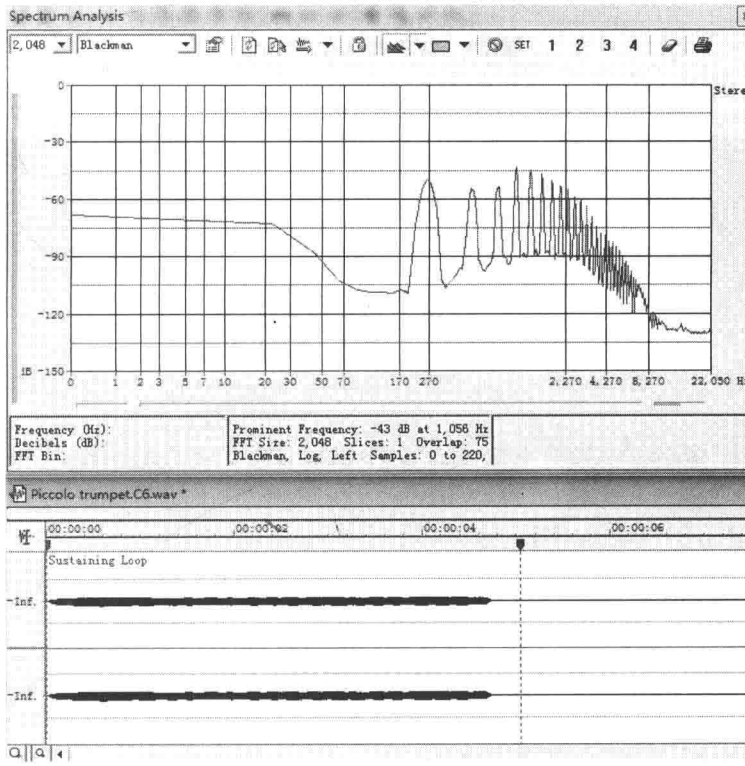


图 6C C 调高音小号 c^1 波形

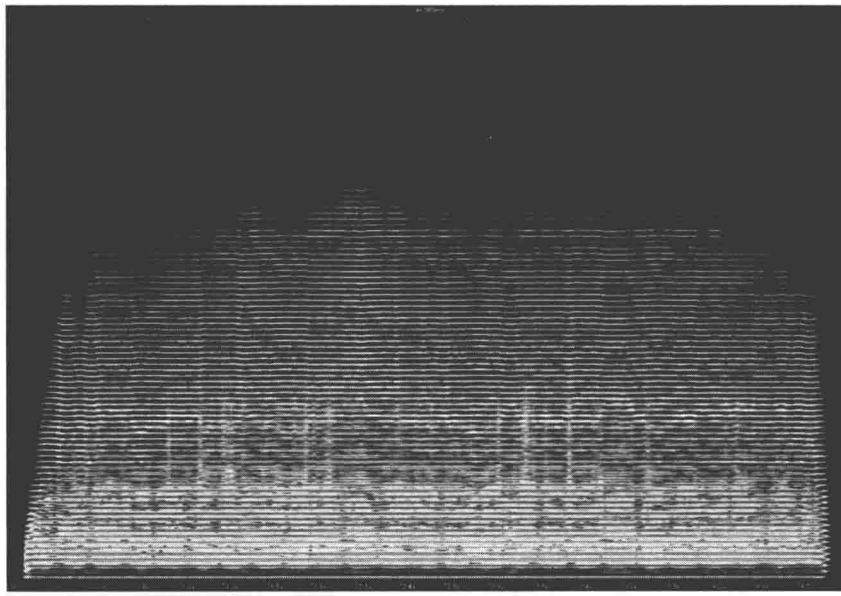


图 7A 降 B 调小号 a^1 频谱

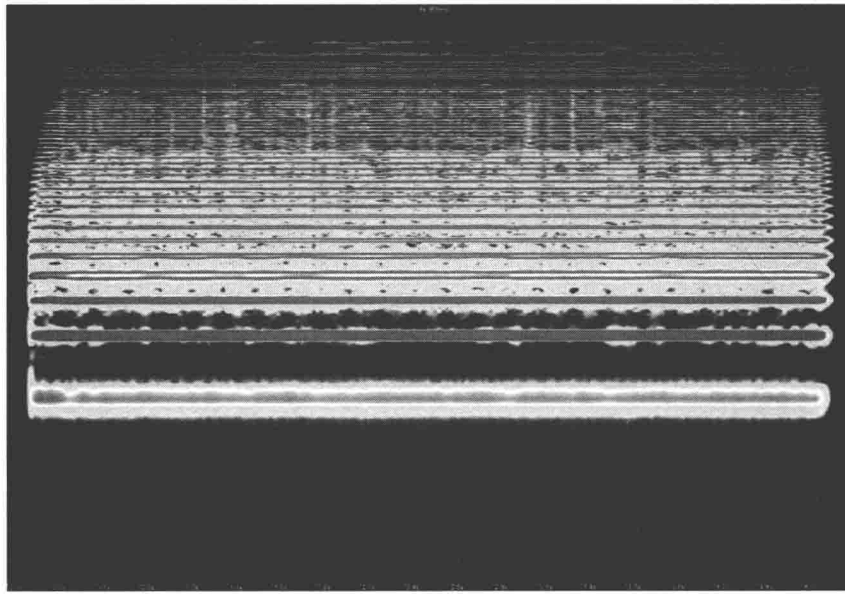


图 7B 基音放大

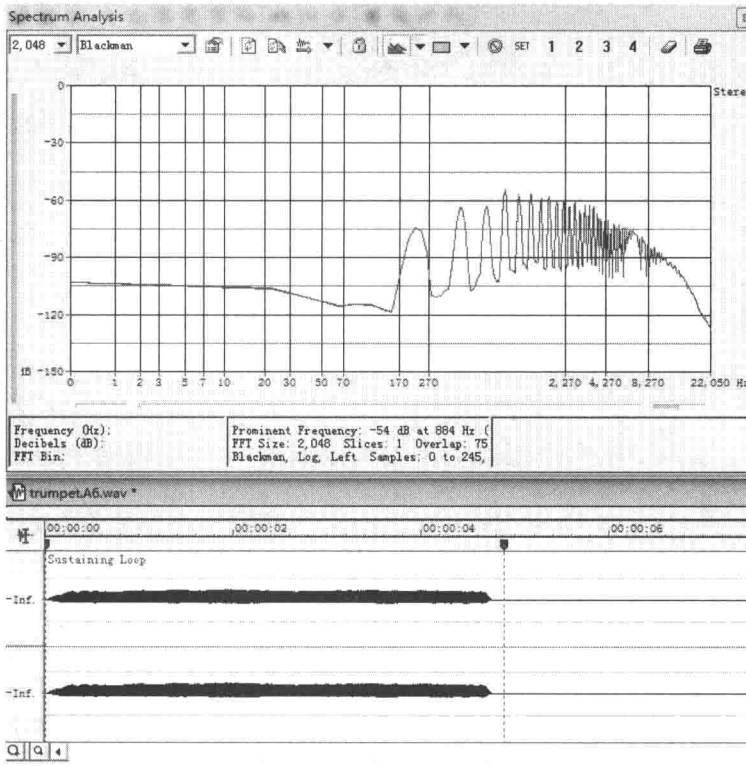


图 7C 降 B 调小号 a^1 波形

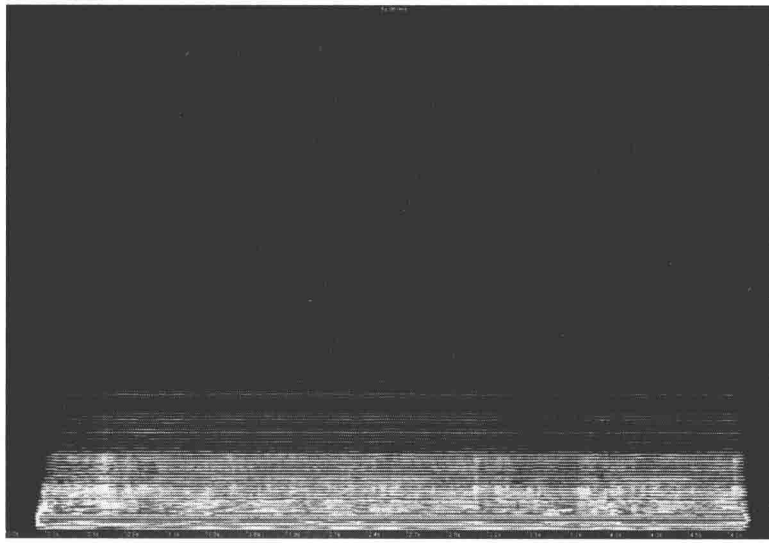


图 8A 圆号 c 频谱

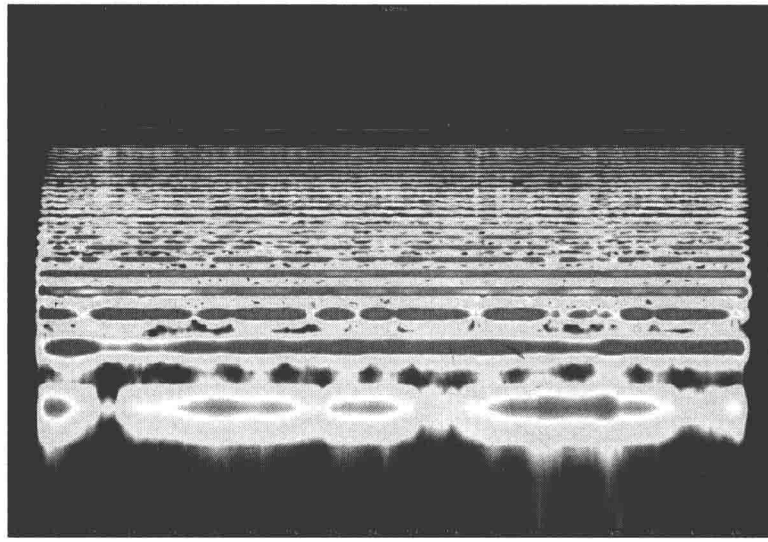


图 8B 基频放大

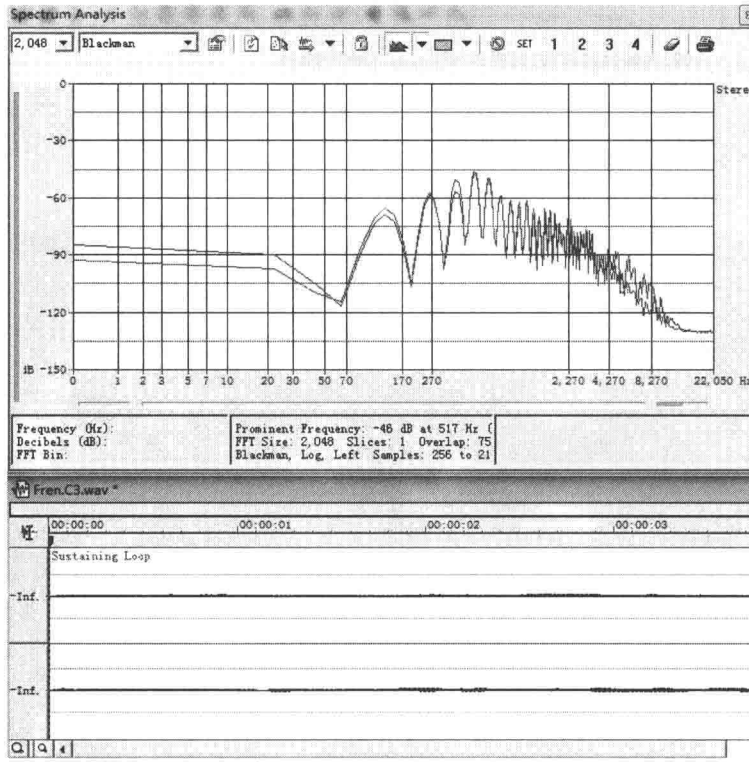


图 8C 圆号 c 波形

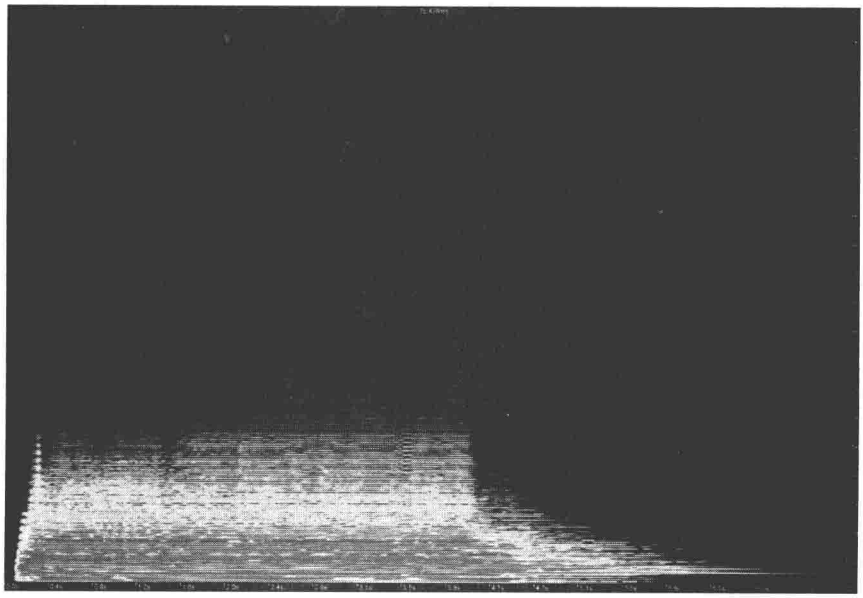


图 9A 长号 E 频谱图

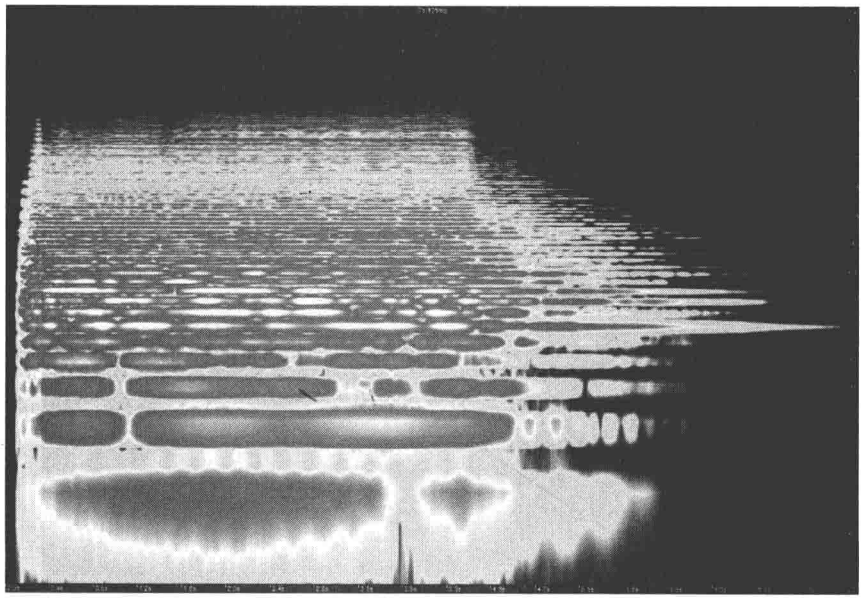


图 9B 长号 E 基频放大频谱图

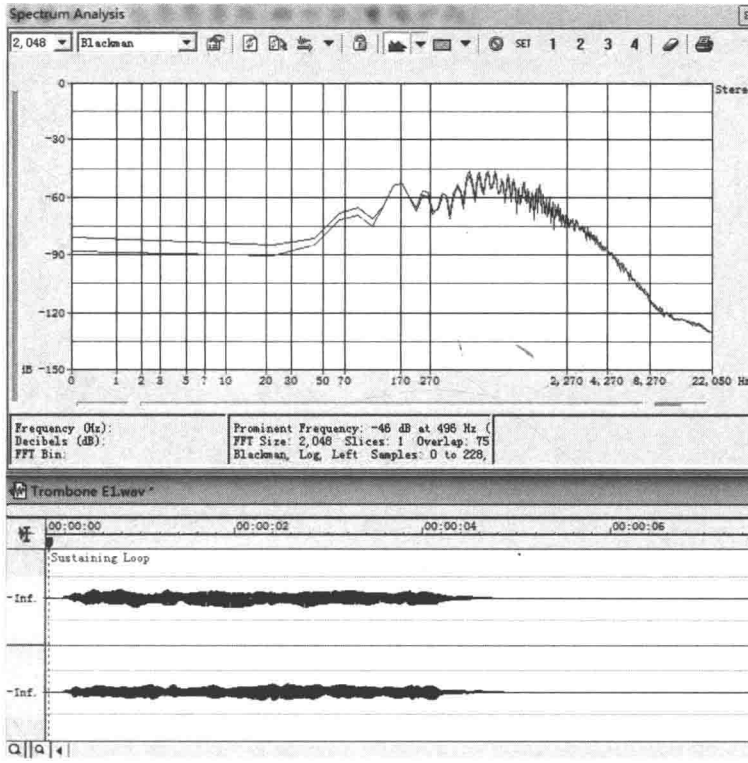


图 9C 长号 E soundforge 频谱分析图

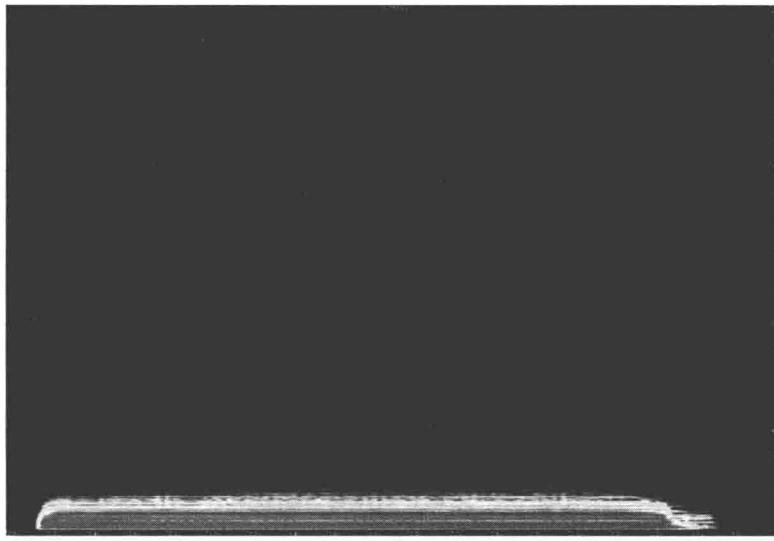


图 10A 大号 C 频谱

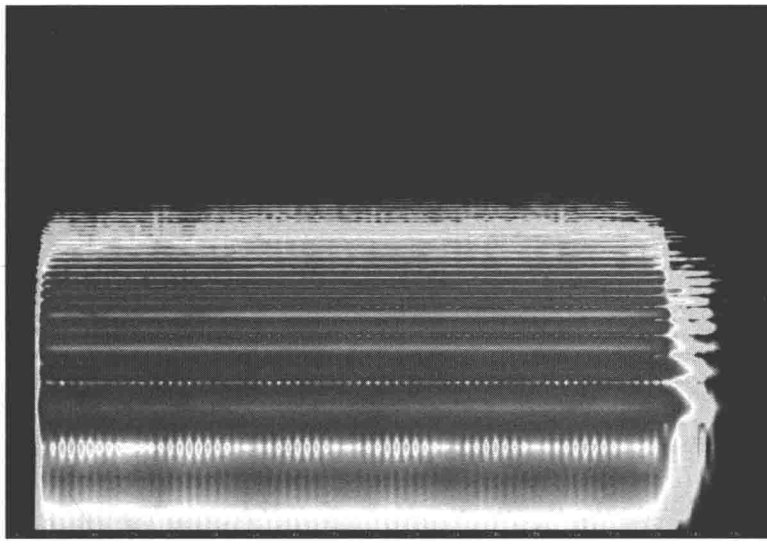


图 10B 基频放大

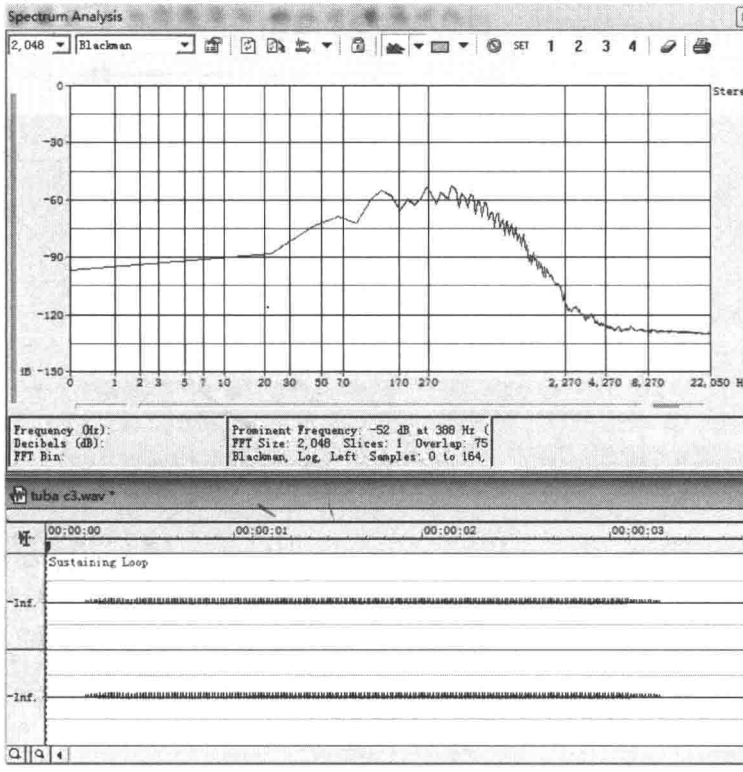


图 10C 大号 C 波形

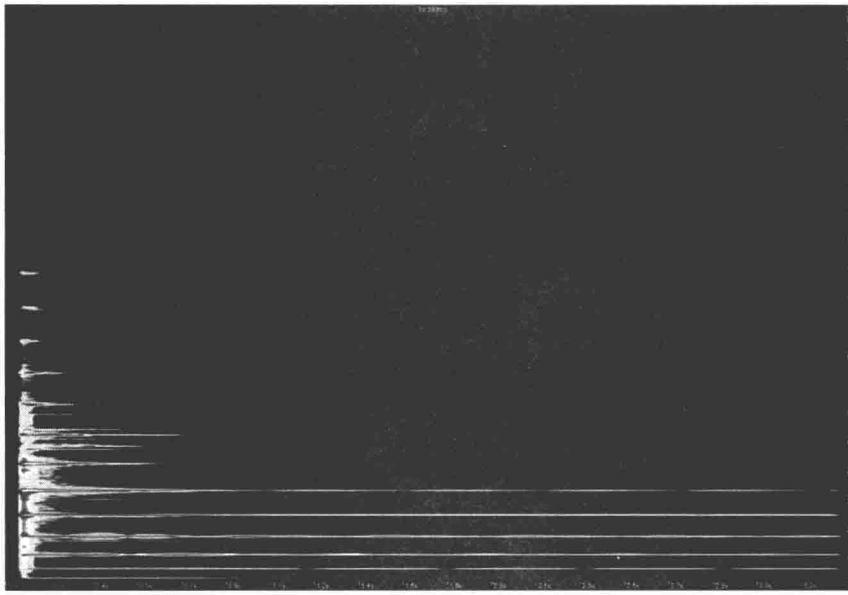


图 11A 钟琴 a^3 频谱

图 11B 基频放大

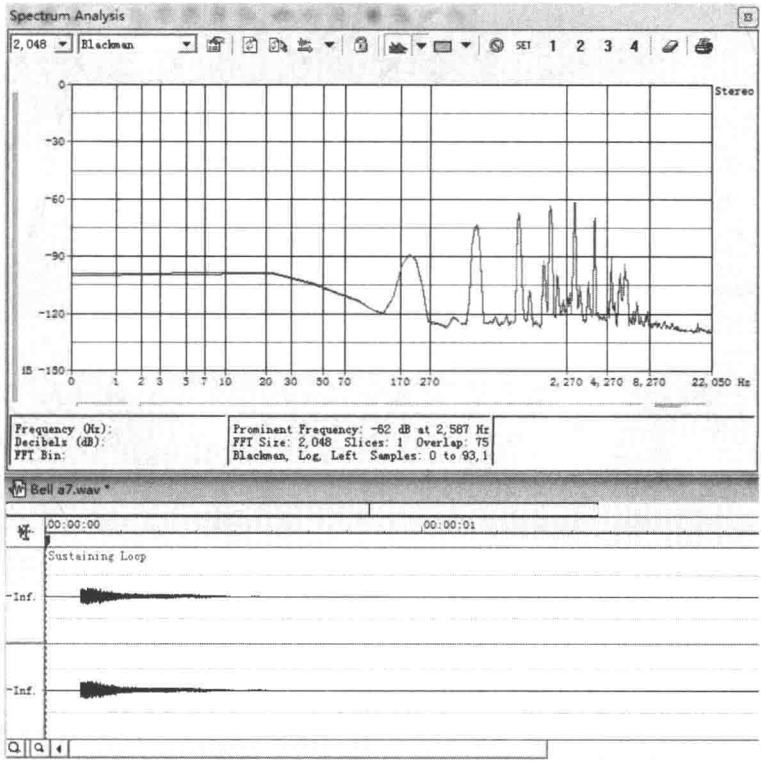


图 11C 钟琴 a^3 波形

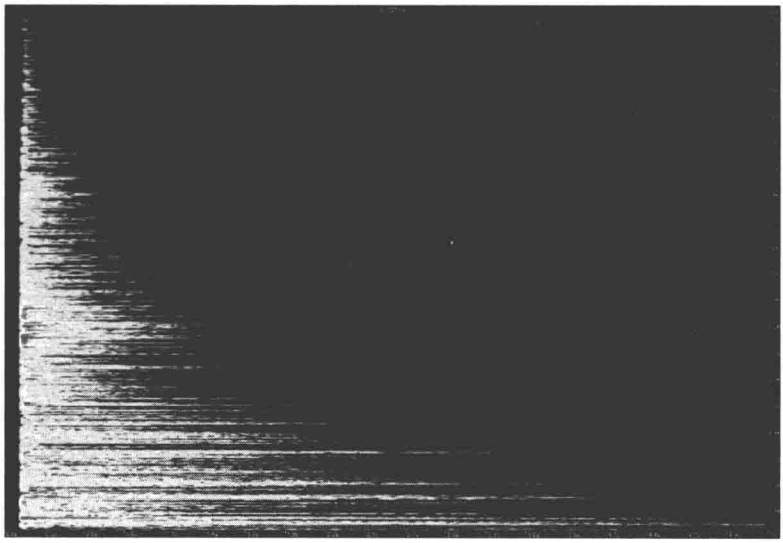


图 12A 吊镲频谱

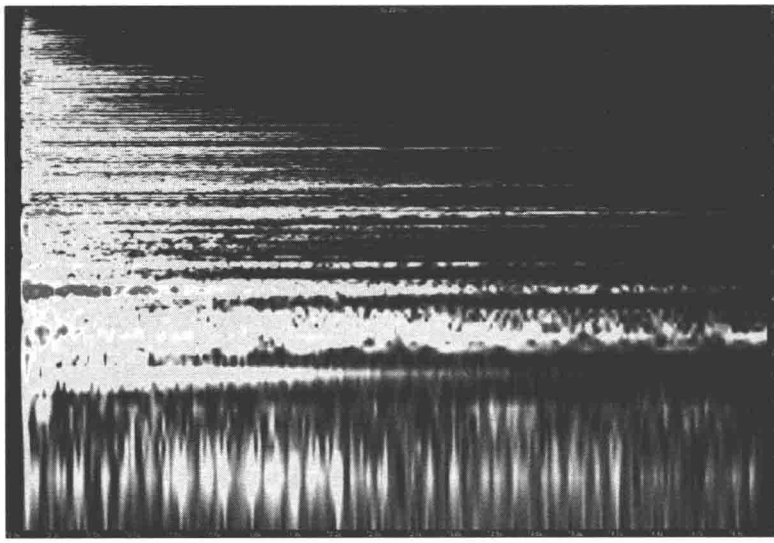


图 12B 基频放大

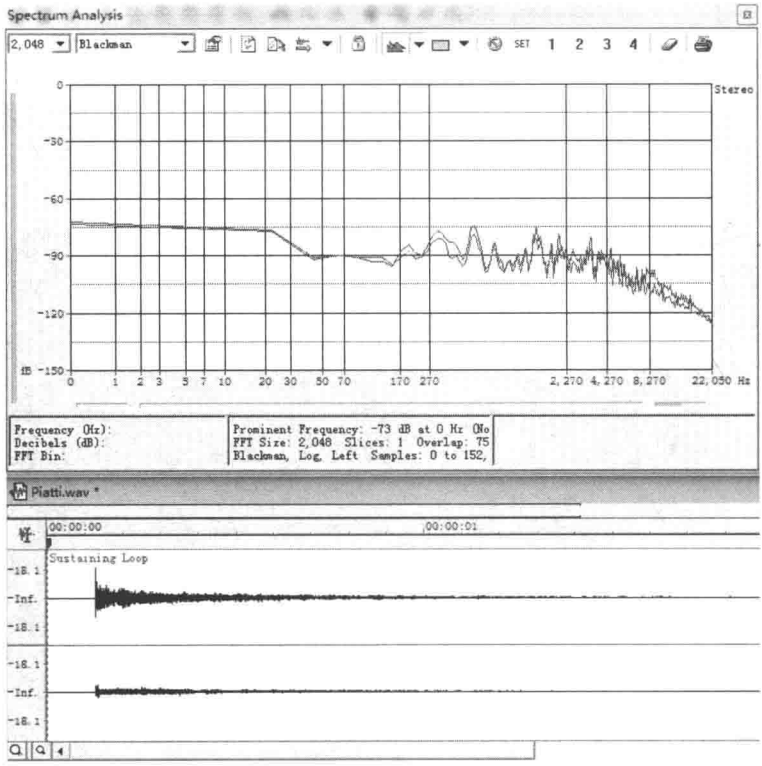


图 12C 吊镲波形

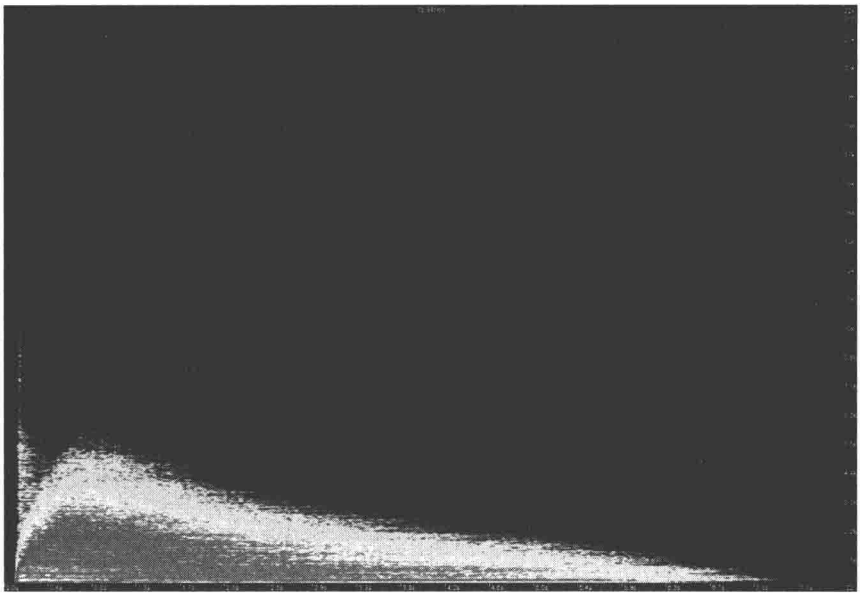


图 13A 大锣频谱

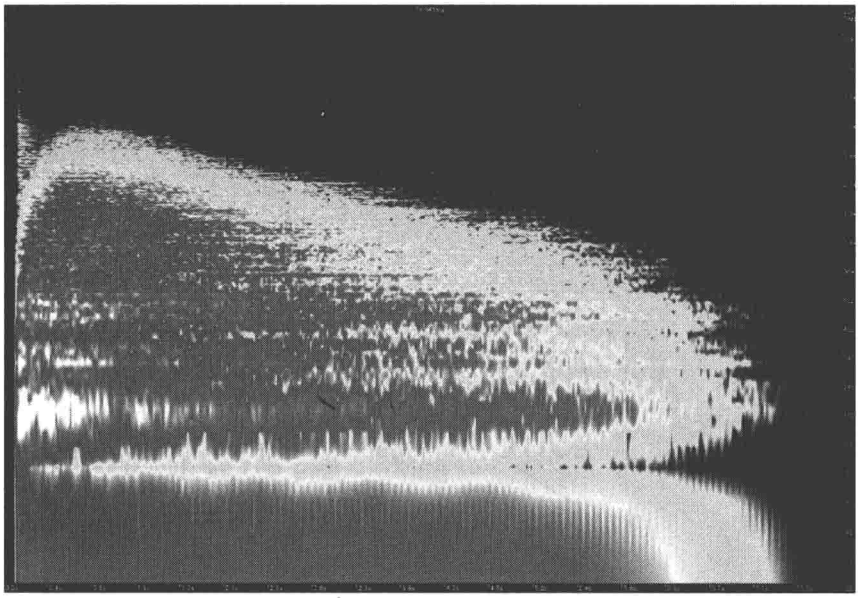


图 13B 基频放大

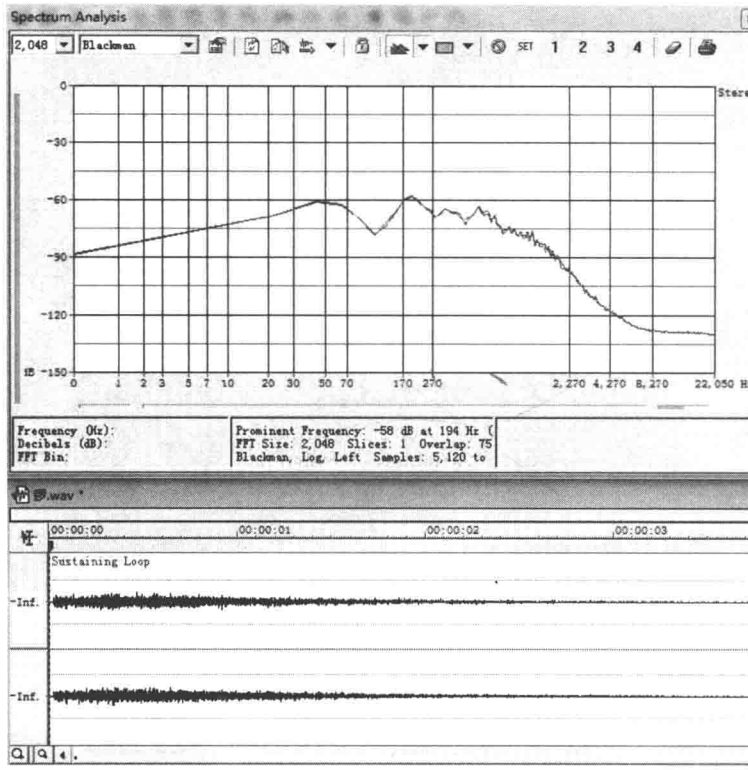


图 13C 大锣波形

图 14A 定音鼓 C 频谱

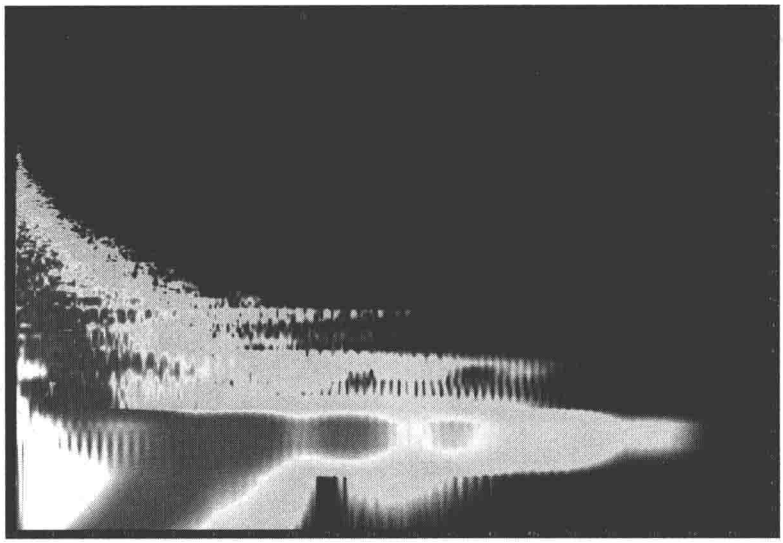


图 14B 基频放大

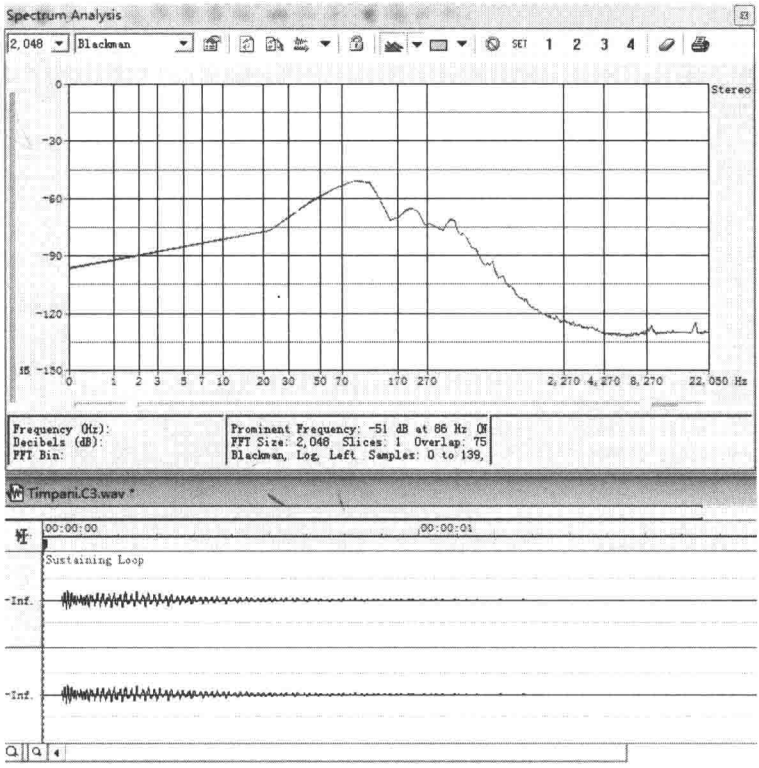


图 14C 定音鼓 C 波形

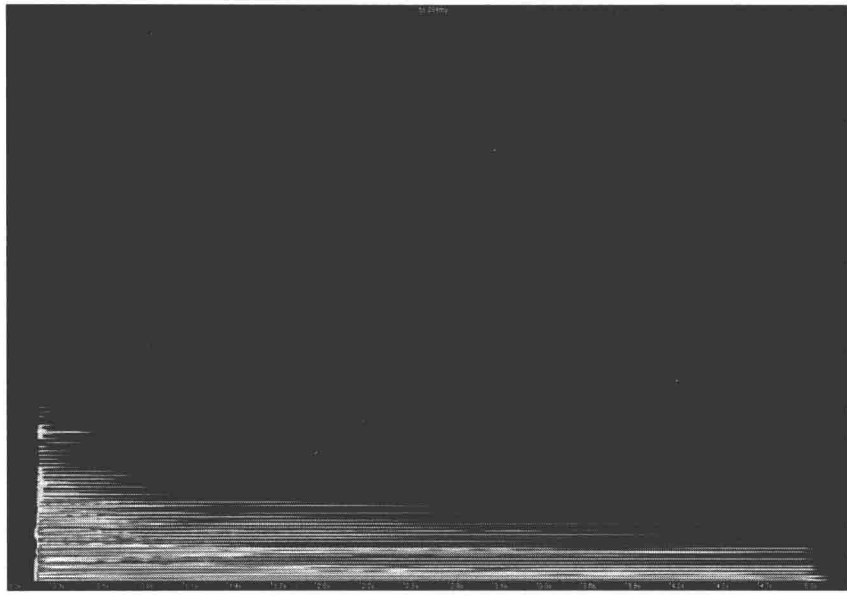


图 15A 钢琴 c^1 频谱图

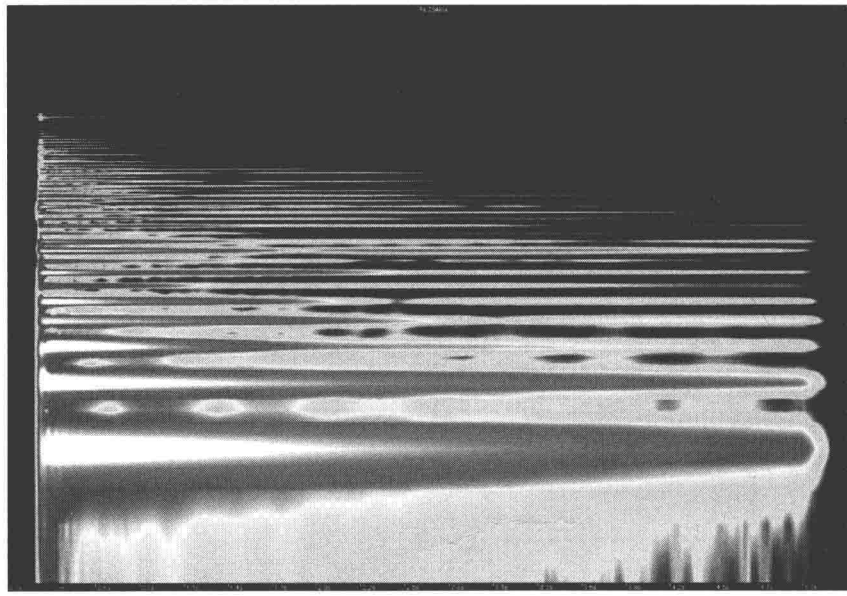


图 15B 钢琴 c^1 基频放大频谱图

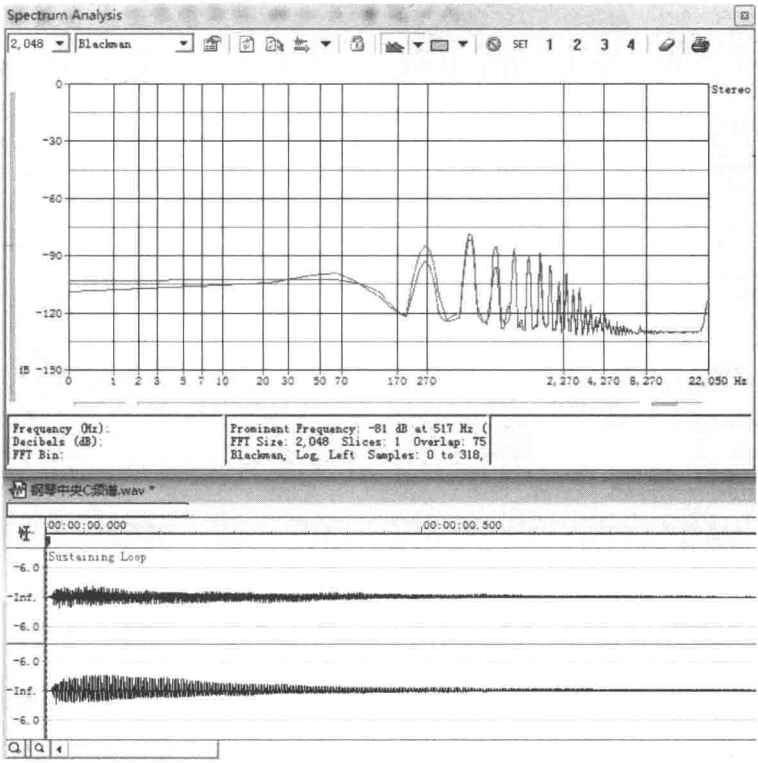


图 15C 钢琴 c^1 soundforge 频谱分析图

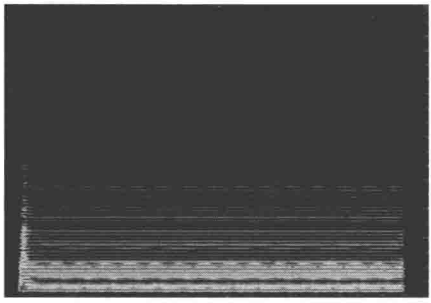


图 16A 小提琴 c^1 不揉弦频谱

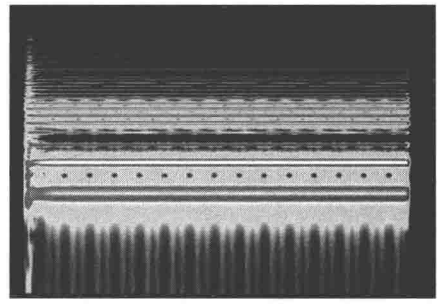


图 16B 小提琴 c^1 不揉弦基频放大频谱

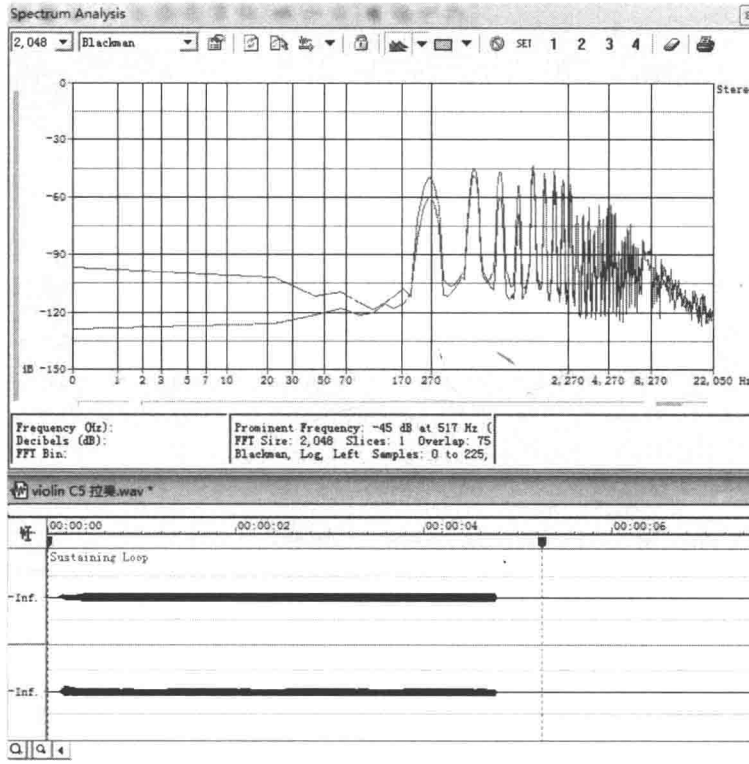


图 16C 小提琴 c^1 不揉弦 soundforge 频谱分析

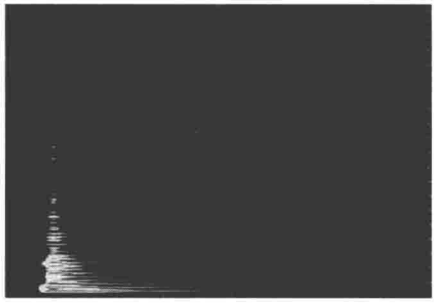


图 16D 小提琴 c^1 拨奏频谱

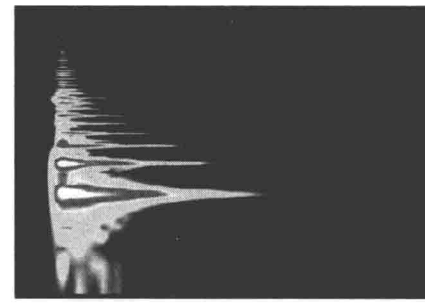


图 16E 小提琴 c^1 拨奏基频放大频谱

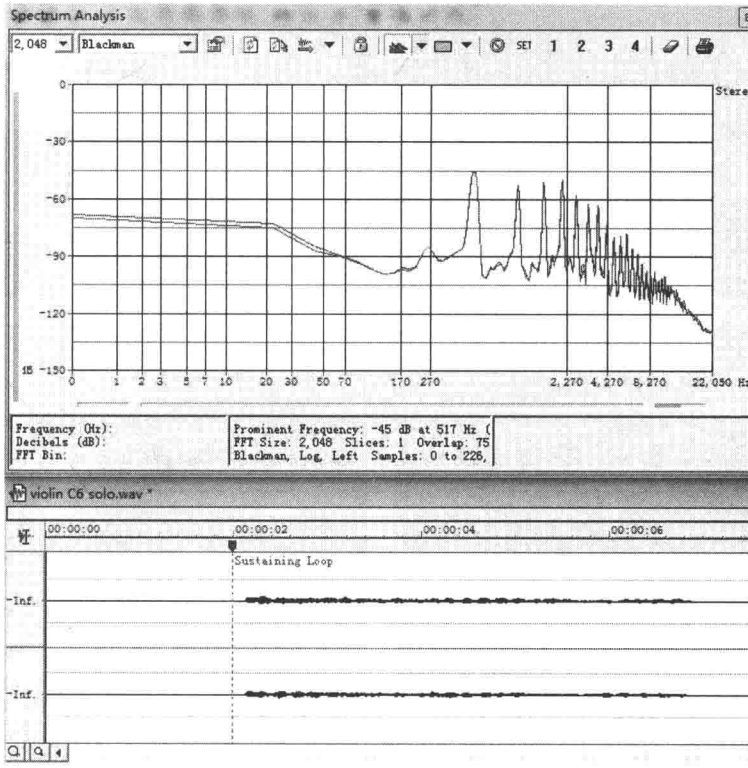


图 16F 小提琴 c^1 揉弦 soundforge 频谱分析

小提琴 和弦频谱

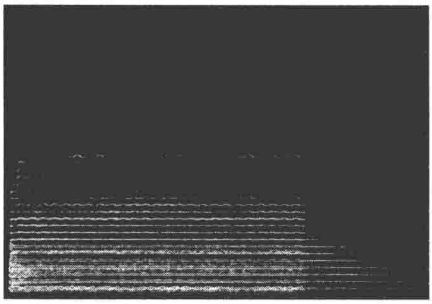


图 16G 小提琴 c^1 揉弦频谱

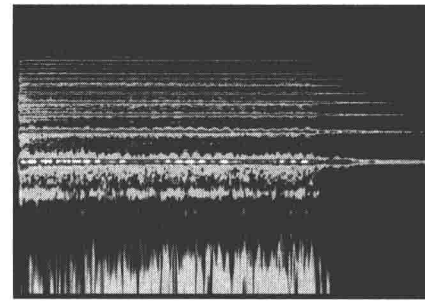


图 16H 小提琴 c^1 揉弦基频放大频谱

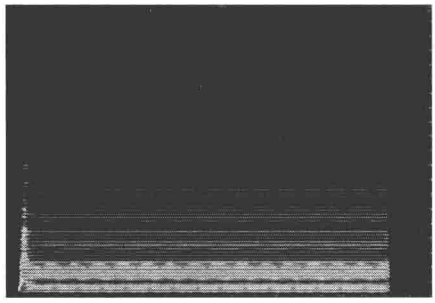


图 16I 小提琴 c^1 不揉弦频谱图

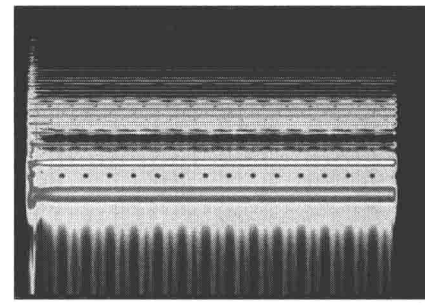


图 16J 小提琴 c^1 不揉弦基频放大频谱

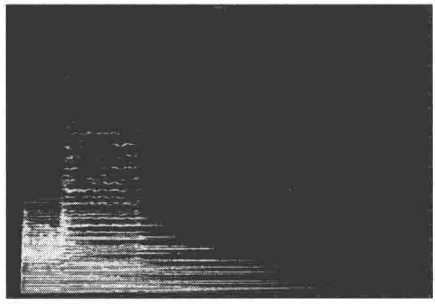


图 16K 小提琴和弦频谱图

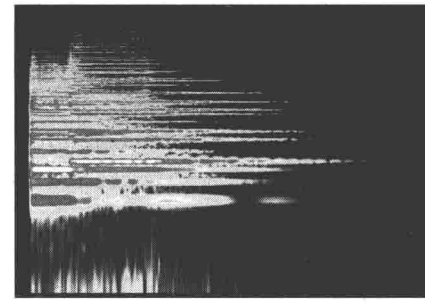


图 16L 小提琴和弦基频放大频谱

图 16M 小提琴 c^1 向上滑一个八度频谱

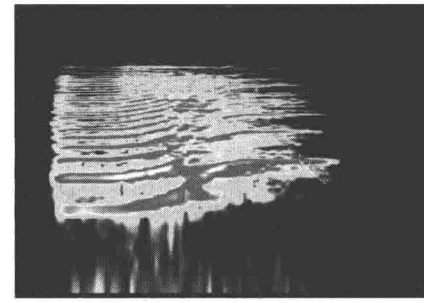


图 16N 小提琴 c^1 向上滑一个八度基频放大频谱

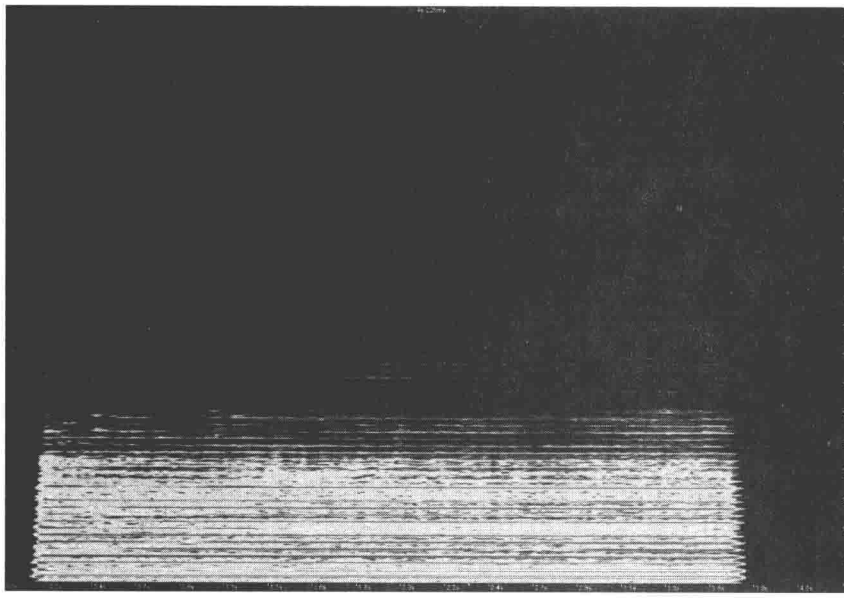


图 17A 中提琴 C 频谱图

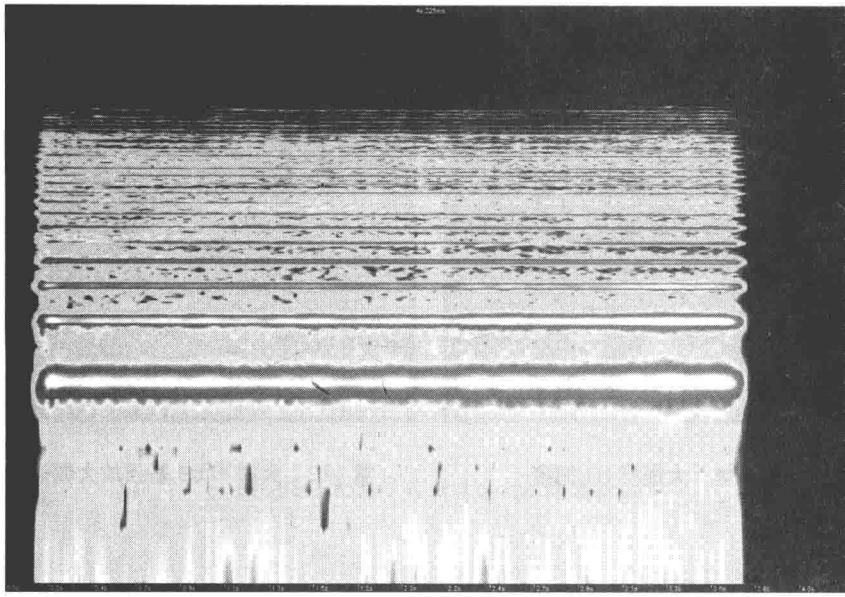


图 17B 中提琴 C 基频放大频谱图

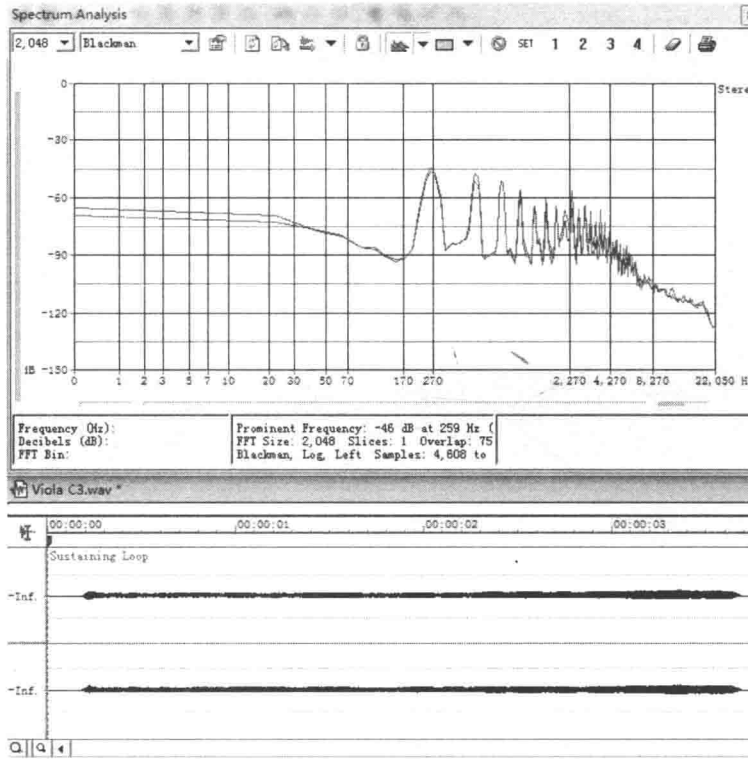


图 17C 中提琴 C soundforge 频谱分析图

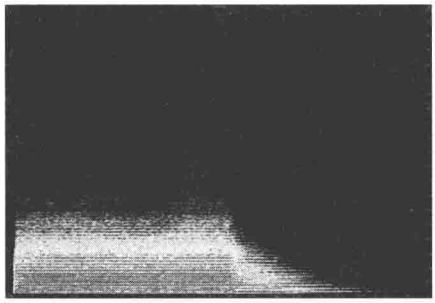


图 18A 大提琴 bB 频谱

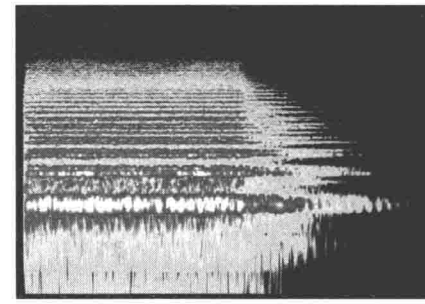


图 18B 大提琴 bB 基频放大频谱

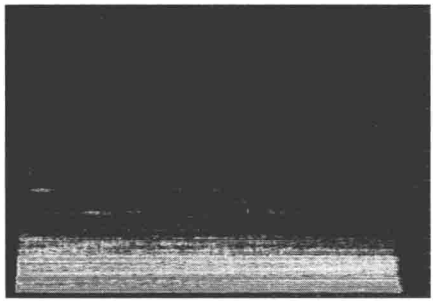


图 18C 大提琴 C 频谱

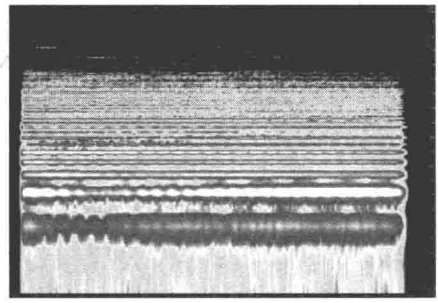


图 18D 大提琴 C 基频放大频谱

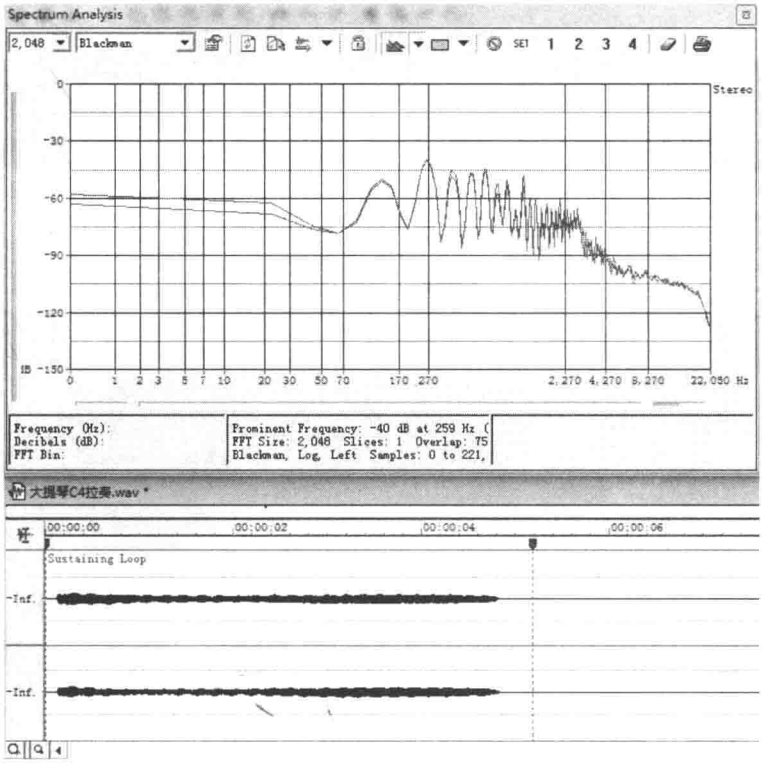


图 18E 大提琴 C soundforge 频谱分析

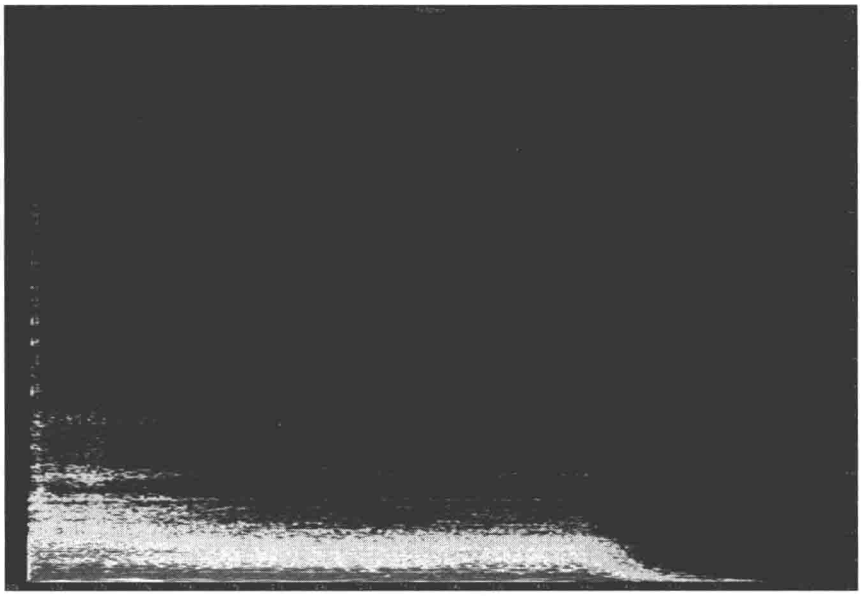


图 19A 低音贝司 E_1 频谱图

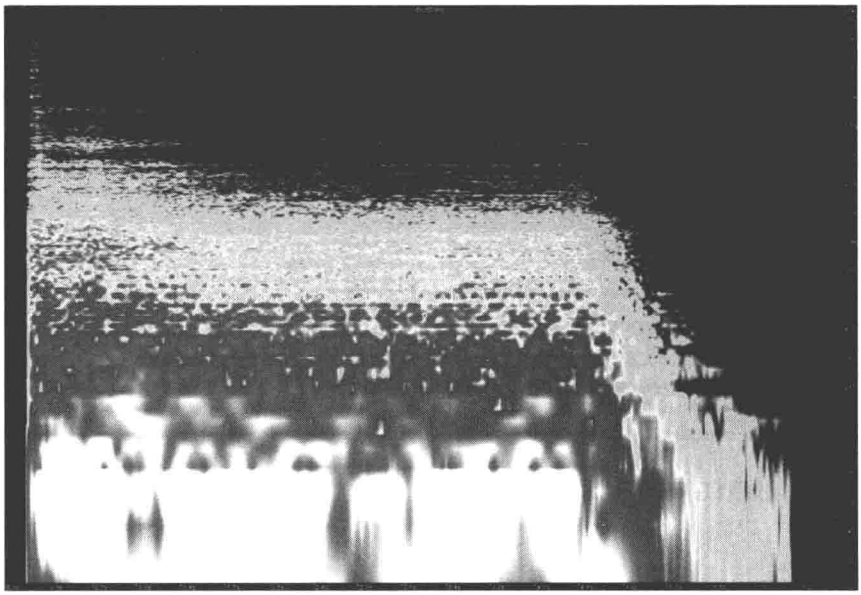


图 19B 低音贝司 E_1 基频放大频谱图

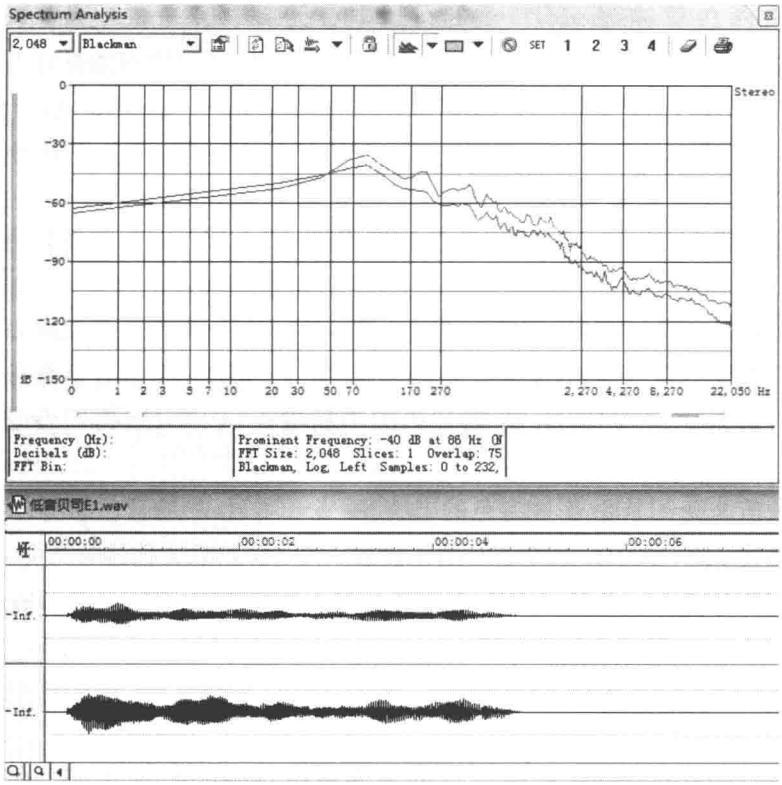


图 19C 低音贝司 E_1 soundforge 频谱分析

附录五　乐器的重要频率范围表

小提琴 200－400Hz 影响音色的丰满度；1－2KHz 是拨弦声频带；6－10KHz是音色明亮度。

中提琴 150－300Hz 影响音色的力度；3－6KHz 影响音色表现力。

大提琴 100－250Hz 影响音色的丰满度；1－3KHz 影响音色明亮度。

贝司提琴 50－150Hz 影响音色的丰满度；1－2KHz 影响音色的明亮度。

长笛 250－1KHz 影响音色的丰满度；5－6KHz 影响音色的明亮度。

黑管 150－600Hz 影响音色的丰满度；3KHz 影响音色的明亮度。

双簧管 300－1KHz 影响音色的丰满度；5－6KHz 影响音色的明亮度；1－5KHz 区间使音色明亮华丽。

大管 100－200Hz 音色丰满、深沉感强；2－5KHz 影响音色的明亮度。

小号 150－250Hz 影响音色的丰满度；5－7.5KHz 是明亮清脆感频带。

圆号 60－600Hz 区间会使音色和谐自然；强吹音色光辉，1－2KHz 明显增强。

长号 100－240Hz 影响音色的丰满度；500－2KHz 区间使音色变辉煌。

大号 30－200Hz 影响音色的丰满度；100－500Hz 区间使音色深沉、厚实。

钢琴 27.5—4.86KHz 是音域频段。音色随频率增加而变得单薄；20－50Hz是共振峰频率。

竖琴 32.7－3.136KHz 是音域频率。小力度拨弹音色柔和；大力度拨弹音色丰满。

萨克斯管 600－2KHz 影响明亮度；提升此频率可使音色华彩清透。

萨克斯管降 E 100－300Hz 是影响音色的淳厚感，提升此频段可使音色的始振特性更加细腻，增强音色的表现力。

吉他 100－300Hz 区间增加音色的丰满度；2－5KHz 区间增强音色的表现力。

低音吉他 60－100Hz 低音丰满；60－1KHz 影响音色的力度；2.5KHz 是拨弦声频。

电吉他 240Hz 是丰满度频率；2.5KHz 是明亮度频率 3－4KHz 拨弹乐器的性格表现得更充分。

电贝司 80－240Hz 是丰满度频率；600－1KHz 影响音色的力度；2.5KHz 是拨弦声频。

手鼓 200－240Hz 共鸣声频；5KHz 影响临场感。

小军鼓（响弦鼓）240Hz 影响饱满度；2KHz 影响力度（响度）；5KHz 是响弦音频（泛音区）。

通通鼓 360Hz 影响丰满度；8KHz 为硬度频率；泛音可达 10－15KHz。

低音鼓 60－100Hz 为低音力度频率；2.5KHz 是敲击声频率；8KHz 是鼓皮泛音声频。

地鼓（大鼓）60－150Hz 是力度音频，影响音色的丰满度；5－6KHz 是泛音声频。

镲 250Hz 强劲、坚韧、锐利；7.5－10KHz 音色尖利；1.2－15KHz 镲边泛音“金光四溅”。

歌声（男）150－600Hz 影响歌声力度，提升此频段可以使歌声共鸣感强，增强力度。

歌声（女）1.6－3.6KHz 影响音色的明亮度，提升此段频率可以使音色鲜明通透。

语音 800Hz 是“危险”频率，过于提升会使音色发“硬”、发“愣”。

沙哑声区间 64－261Hz 会使音色得到改善。

喉音重衰减 600－800Hz 会使音色得到改善。

鼻音重衰减 60－260Hz，提升 1－2.4KHz 可以改善音色。

齿音重 6KHz 过高会产生严重齿音。

咳音重 4KHz 过高会产生咳音严重现象（电台频率偏离时的音色）。

附录六 十二平均律各律音的频率

（第一国际音高 a^1＝440Hz）

律音	S	f	2πf	律音	S	f	2πf	律音	S	f	2πf
C_2	0	16.352	102.74	c	36	130.31	821.92	c^3	72	1046.5	6575.4
#C_2	1	17.324	108.85	#c	37	138.59	870.79	#c^3	73	1108.7	6966.4
D_2	2	18.354	115.32	d	38	146.83	922.58	d^3	74	1174.7	7380.6
#D_2	3	19.445	122.18	#d	39	155.56	977.43	#d^3	75	1244.5	7819.5
E_2	4	20.602	129.44	e	40	164.81	1035.6	e^3	76	1318.5	8284.4
F_2	5	21.827	137.14	f	41	174.61	1097.1	f^3	77	1396.9	8777.1
#F_2	6	23.125	145.30	#f	42	185.00	1162.4	#f^3	78	1480.0	9299.0
G_2	7	24.500	153.93	g	43	196.00	1231.5	g^3	79	1568.0	9851.9
#G_2	8	25.957	163.09	#g	44	207.65	1304.7	#g^3	80	1661.2	10438
A_2	9	27.500	172.50	a	45	220.00	1382.3	a^3	81	1760.0	11058
#A_2	10	29.135	183.06	#a	46	233.08	1464.5	#a^3	82	1864.7	11716
B_2	11	30.868	193.95	b	47	246.94	1551.6	b^3	83	1975.5	12413
C_1	12	32.703	205.48	c^1	48	261.63	1643.8	c^4	84	2093.0	13151
#C_1	13	34.648	217.70	#c^1	49	277.18	1741.6	#c^4	85	2217.5	13953
D_1	14	36.708	230.64	d^1	50	293.66	1845.2	d^4	86	2349.3	14761
#D_1	15	38.891	244.36	#d^1	51	311.13	1954.9	#d^4	87	2489.0	15639
E_1	16	41.203	258.89	e^1	52	329.62	2071.1	e^4	88	2637.0	16569
F_1	17	43.654	274.28	f^1	53	349.23	2194.3	f^4	89	2793.8	17554
#F^1	18	46.249	290.59	#f^1	54	369.99	2324.7	#f^4	90	2960.0	18598
G_1	19	48.999	307.87	g^1	55	392.00	2463.0	g^4	91	3136.0	19704
#G_1	20	51.913	326.18	#g^1	56	415.30	2609.4	#g^4	92	3322.4	20875
A_1	21	55.000	345.58	a^1	57	440.00	2764.0	a^4	93	3520.0	22117
#A_1	22	58.270	366.12	#a^1	58	466.16	2929.0	#a^4	94	3729.3	23432
B_1	23	61.735	387.90	b^1	59	493.88	3103.2	b^4	95	3951.1	24825
C	24	65.406	410.96	c^2	60	523.25	3287.7	c^5	96	4186.0	26301
#C	25	69.269	435.40	#c^2	61	554.37	3483.2	#c^5	97	4434.9	27865
D	26	73.416	461.29	d^2	62	587.33	3690.3	d^5	98	4698.6	29522
#D	27	77.782	488.72	#d^2	63	622.25	2909.7	#d^5	99	4978.1	31278
E	28	82.407	517.78	e^2	64	659.26	4142.2	e^5	100	5274.0	33138
F	29	87.307	548.57	f^2	65	698.46	4388.5	f^5	101	5587.7	35108
#F	30	92.499	581.19	#f^2	66	739.99	4649.5	#f^5	102	5919.9	37196
G	31	97.999	615.74	g^2	67	783.99	4926.0	g^5	103	6271.9	39408
#G	32	103.83	652.36	#g^2	68	830.61	5218.9	#g^5	104	6644.9	41751
A	33	110.00	691.15	a^2	69	880.00	5529.2	a^5	105	7040.0	44234
#A	34	116.54	732.25	#a^2	70	932.33	5858.0	#a^5	106	7458.6	46864
B	35	123.47	775.79	b^2	71	987.77	6206.3	b^5	107	7902.1	49651

注：律音的符号有多种，表中只是一种，S表示C_2以上的半音数，f表示频率。

88键钢琴音域是A_2-c^5。

（上表参考马大猷《声学手册》，科学出版社1983年版，表24·1·4再编辑）

附录七 谱例图形索引

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
1	例 1A：频率与振幅的频谱图	Barry Truax's HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY	4
2	例 1B：时间与振幅的频谱图	Paul Masri：COMPUTER MODELLING OF SOUND FOR TRANSFORMATION AND SYNTHESIS OF MUSICAL SIGNALSP 54	4
3	例 1C：时间与频率的频谱图	同上，P31	4
4	例 1D－E 时间、频率、振幅的三维频谱图	D 摘自 Barry Truax，E 摘自 Paul Masri	4
5	例 2：频率振幅二维频谱图	Barry Truax's HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY	5
6	例 3A：大提琴小字组降 b 拉奏频谱图		6
7	例 3B：大提琴小字组降 b 拉奏·全域频谱图		7
8	例 3C：大提琴小字组降 b 拉奏·Sound forge 频谱逻辑分析图		7
9	例 4：频率时间采样二维图	Paul Masri	8
10	例 5：正弦波形采样演示图		8
11	例 6：协和与不协和频谱函数图	Tristan Murail (translated by Tod Machover)：Spectra and Sprites	9
12	例 7A：大提琴降 b 拉奏·频谱放大图		10
13	例 7B：大提琴小字组降 b 拉奏·放大图（频谱点粒子显示）		10
14	例 8：ADSR 包络图	Computer Music2000《Analogue synthesis for beginners》	12

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
15	例 9：小提琴自由跳弓 C^1 频谱图		12
16	例 10：长号、管风琴、雷击声包络图	Computer Music 2000《Analogue synthesis for beginners》	13
17	例 11：频率时间二维频谱	Visualization of Multi－Part Music（Acoustics and Perception）Werner・ A. Franz Födermayr	21
18	例 12：加减法合成旁频	Barry Truax's HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY	21
19	例 13：理论泛音及其相邻音之间的音程间距		23
20	例 14：整数倍音频率表		25
21	例 15：自然音程的音高和频率在不同律制的音分值对比表		27
22	例 16：比率计算泛音表频率图		29
23	例 17：1－116 号泛音振幅数据	转自 Contemporary Music Review / volume 24 Number 2/3April/June 2005，p. 192	30
24	例 18：2－50 号共振峰划分	Tristan Murail Villeneuve-les-Avignon Conferences，Centre Acanthes，9－11 and 13 July 1992	31
25	例 19：过滤后的2－43 号泛音音高及力度分布图	同上，P227	32
26	例 20：理论泛音与实验泛音的音高对比	同上，P227	32
27	例 21：理论泛音与钢琴测试泛音函数图解	同上，P228	32
28	例 22：部分乐器共振频率范围		33
29	例 23：自然微分音程出现的下界线		35
30	例 24：单位节奏值递减图		38

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
31	例 25：一个八度内的音数标记		39
32	例 26：一般情况下交响乐队的总体音响动态范围	杨立青：《管弦乐配器法教程》第一卷（文字部分），上海音乐学院作曲指挥系，1991 年 12 月版	40
33	例 27：一般情况下声音的分贝水平	Barry Truax《HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY》*Originally published by the World Soundscape Project*，*Simon Fraser University*，*and ARC Publications*，1978	40
34	例 28：正弦波		40
35	例 29：三角波及其谐波分布		41
36	例 30：方波		41
37	例 31：锯齿波	南京大学《声学基础》教材	42
38	例 32：脉冲波	南京大学《声学基础》教材	42
39	例 33：正弦、锯齿波音高数列	Barry Truax《HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY》	49
40	例 34：方波、三角波音高数列		49
41	例 35：1∶3 的脉冲音高数列		50
42	例 36：1∶4 的脉冲音高数列		50
43	例 37：钢琴 C_1 在前 33 个倍音区间的共振峰音高数列	Tristan Murail Villeneuve — les — Avignon Conferences，Centre Acanthes，9—11 and 13 July 1992 *Contemporary Music Review Vol*. 24，*No*. 2/3，*April/June* 2005，p. 213	50
44	例 38：带通滤波器在 290—880Hz 频率范围内对钢琴 C_1 理论泛音滤波		51
45	例 39：三个八度的白色噪音频谱图	*Barry Truax's* HANDBOOK FOR ACOUSTIC ECOLOGY	53

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
46	例 40：杰勒德·格瑞瑟的作品《分音》总谱第 1 页	根据 Ricordi 版总谱（米兰，1976）重新绘制	58
47	例 41：以钢琴升 A_2 为基音的共振峰和弦	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 214	59
48	例 42：方波滤波钢琴 C_1 泛音列	Tristan Murail ：The Revolution of Complex Sounds	60
49	例 43：梳通滤波器的协和频谱	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 242	60
50	例 44：提斯坦·缪哈耶在室内乐作品《太空》（*Ethers*）协和结构的内部运动	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 128	61
51	例 45：提斯坦·缪哈耶在作品《瓦解》第 IX 部分使用的一个音程	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 233	62
52	例 46：振幅调制频率表		63
53	例 47：缪哈耶在《瓦解》第 IX 部分调制生成的矩阵	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，*p.* 233	63
54	例 48：杰勒德·格瑞瑟的《分音》音高生成原理	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 129	64
55	例 49：缪哈耶在《忆/蚀》的开始使用发生器原理生成系列组织音高	同上	64
56	例 50：缪哈耶在《空间激流》（*Les Courants de l'Espace*）的结束部应用的频率移动	同上，P222	65
57	例 51：频率调制边带（旁频）的位置	ComputerMusic《The CM Guide to FM Synthesis》及 Sound On Sound《Synth secrets—》	66
58	例 52：缪哈耶在《龚德沃呐》设计的一对“原始音程”	Villeneuve-les-Avignon Conferences，Centre Acanthes，9—11 and 13 July 1992，p. 206	66

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
59	例 53：缪哈耶在《龚德沃呐》用频率调制生成的矩阵	同上	67
60	例 54：调制矩阵系列	同上，P207	67
61	例 55：缪哈耶在《龚德沃呐》的 F 部分频率调制系列矩阵	同上，P210	68
62	例 56：射线型旋律		76
63	例 57：直线型旋律	缪哈耶作品《瑟弘迪》(Serendib) 排练号 16 处	77
64	例 58：不等时值直线型旋律	G. 格瑞瑟《时间的漩涡 III》排练号 26 处	77
65	例 59：拍音型旋律	肖武雄大型室内乐作品《佛光穹影》第 28、67、165 小节局部	78
66	例 60：锯齿型旋律 A	缪哈耶《夕阳的十三种颜色》排练号 [O] d 处	79
67	例 61：锯齿型旋律 B	同上	79
68	例 62：锯齿型旋律 C	同上	80
69	例 63：锯齿型旋律 D	同上	81
70	例 64：增益型上行阶梯旋律 A	G. 格瑞瑟《时间的漩涡 III》	82
71	例 65：增益型上行阶梯旋律 B	G. 格瑞瑟《起源》排练号 22 处，Ricordi 版，后同	82
72	例 66：增益型上行阶梯旋律 C	T. 缪哈耶《遗忘的土地》(*Territoires de l'oubli*) 总谱第 32 页	83
73	例 67：衰减型下行阶梯旋律	T. 缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页	83
74	例 68：带状旋律 A	T. 缪哈耶《瑟弘迪》弦乐部分总谱第 12 页	85
75	例 69：带状旋律 B	同上，总谱第 16 页	85
76	例 70：合纵旋律	同上，总谱第 9 页	87
77	例 71：T. 缪哈耶以升 A_1 为低音（基音）测出的泛音和力度级	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 213	90

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
78	例 72：T. 缪哈耶以升 A_2 为基音，提取的共振峰泛音	同上	90
79	例 73：以钢琴升 A_2 和升 C 为基音的共振峰音列	同上，P218	91
80	例 74：以钢琴升 A_2 和升 C 为基音的共振峰组成的倍频和弦	同上，P214	91
81	例 75：卡尔嘉·萨瑞拉禾《亭院秘密 I》的倍频和弦运用	*Contemporary Music Review Vol.* 19 *Part*3，2000，p. 86	91
82	例 76：缪哈耶在钢琴作品《遗忘的土地》E 部分的和弦	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 242	93
83	例 77：缪哈耶在钢琴作品《遗忘的土地》E 部分和弦呈示	总谱第 19 页	93
84	例 78：长号 E_1 频谱音列	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 162	94
85	例 79：缪哈耶《瓦解》第十部分长号的失真频谱	同上，P230	95
86	例 80：缪哈耶《瓦解》结束部分的微观图	Tristan Murail：Spectra and Sprites*Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 147	97
87	例 81：格瑞瑟《调制》和弦演变频谱	Tristan Murail：The Revolution of Complex SoundsP130	97
88	例 82：缪哈耶《忆/蚀》中简单和弦向复杂和弦的过渡	同上，P133	98
89	例 83：缪哈耶《瓦解》第七部分调制基音的协和频谱与它的失真	Tristan Murail：Target Practice*Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 1641	99
90	例 84：缪哈耶《瓦解》第三部分的倍频和弦	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 223	99

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
91	例 85：十一等级频率移位	同上，P224	100
92	例 86：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中央 C 的回音处理	Tristan Murail：The Revolution of Complex Sounds Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 126	101
93	例 87：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的回声处理	总谱第 7 页	102
94	例 88：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》的回声处理	同上，第 9 页	103
95	例 89：马克·安德烈·达勒巴维《天堂机械》（*Les Paradis Mecaniques*）	总谱第 5 页	104
96	例 90：缪哈耶钢琴《遗忘的土地》中的共鸣处理	总谱第 4 页	104
97	例 91：缪哈耶钢琴《遗忘的土地》中的共鸣处理	总谱第 5 页	105
98	例 92：格瑞瑟《时间的漩涡 I》Loop 运用	*Vortex Temporum* I·II·III 总谱第 1 页	108
99	例 93：格瑞瑟《时间的漩涡 III》Loop 分离	同上，第 84 页	108
100	例 94：格瑞瑟《时间的漩涡 III》Loop	同上，第 92 页	109
101	例 95：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》中的循环处理 A	总谱第 26 页	109
102	例 96：缪哈耶钢琴《遗忘的土地》中的循环处理 B	总谱第 30 页	110
103	例 97：缪哈耶钢琴《遗忘的土地》中的循环处理 C	总谱第 13 页	110
104	例 98：菲利普·宇海勒《形象》的复调处理	总谱第 5 页［Philippe Hurel *Pour l'image*（1986—1987），Gerard Billaudot Editeur，Paris］	111

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
105	例 99：马克·安德烈·达勒巴维在《斯珂勒》(*Scuils* I、II) 和 VII 乐章中的回声节奏设计	Contemporary Music Review2000，Vol. 19，Pan 3，p. fv—l 10，p. 103	112
106	例 100：格瑞瑟《时间的漩涡 III》	总谱第 116 页	113
107	例 101：卡特《双重协奏曲》(*Double Concerto*) 第 44—46 小节的速率节奏设计	by Brian Kane〈That Elusive "Elementary Atom of Music"〉	115
108	例 102：格瑞瑟《起源》	总谱第 26 页	117
109	例 103：马克·安德烈·达勒巴维《王冠》总谱第 9 页的弦乐组部分		119
110	例 104：缪哈耶《瑟弘迪》(音乐会版)	总谱第 12 页	120
111	例 105：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页第 1 小节和弦投影分析		121
112	例 106：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页第 1 小节所使用的音列表		121
113	例 107：E_1 的前三十二号泛音表		122
114	例 108：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第 12 页第 1 小节所使用的二十音音列分类		122
115	例 109：缪哈耶《夕阳的十三种颜色》预制的乐队、音响布局	取自总谱说明	125
116	例 110：徐仪室内乐作品《虚幻》(*Le plein du vide*) 的空间环绕布局	摘自总谱说明	126

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
117	例 111：Open Music 工作原理简图	摘自 Open Music 说明	130
118	例 112：缪哈耶《夕阳的十三种颜色》曲式布局	Tristan Murail：Target Practice Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 166	133
119	例 113：缪哈耶《夕阳的十三种颜色》截稿后的和弦投影图		133
120	例 114：缪哈耶钢琴作品《遗忘的土地》	总谱第 21 页	135
121	例 115：马克·安德烈·达勒巴维作品《天堂机械》	总谱第 3 页	136
122	例 116：马克·安德烈·达勒巴维作品《天堂机械》	总谱第 4 页	137
123	例 117 及例 117 续：Open Music Zn 理论	摘自 Open Music 说明	140
124	例 118：缪哈耶作品《瞭望》中圆号原始协和频谱与三次失真	Tristan Murail：Target Practice Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 169	146
125	例 119：作品《瞭望》中圆号原始协和频谱与三次失真转化的旋律线	同上	146
126	例 120：缪哈耶作品《花园秘密》	总谱第 1 页	150
127	例 121：格瑞瑟《时间的漩涡 III》	总谱第 109 页，排练号 24	151
128	例 122：缪哈耶在作品《寓言》中以大锣的共振峰频谱为合成器载波	*Contemporary Music Review Vol.* 24，*No.* 2/3，*April/June* 2005，p. 251	152
129	例 123：缪哈耶在《寓言》开始部分用频谱调制合成粉色噪音	同上	153

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
130	例124：缪哈耶《寓言》A部分	总谱第1页	154
131	例125：格瑞瑟《时间的漩涡 I、II、III》的间插段	总谱第64页	155
132	例126：缪哈耶作品《寓言》织体预制序进图	Contemporary Music Review Vol. 24，No. 2/3，April/June 2005，p. 259	158
133	例127：缪哈耶《寓言》曲式结构	同上，P260	158
134	例128及例128续：缪哈耶《寓言》第三部分，排练号h处第1—13小节	同上	159 160
135	例129：卡尔嘉·萨瑞拉禾设计的“音响协和轴”	Damien Pousset：The Works of Kaija Saariaho，Philippe Hurel and Marc—Andre Dalbavie—Stile Concertato，Stile Concitato，Stile Rappresentativo Contemporary Music Review2000，Vol. 19，Pan 3，p. fv—l 10	162
136	例130：卡尔嘉·萨瑞拉禾设计作品《威伯林根》的第一个曲式草图	同上	163
137	例131：卡尔嘉·萨瑞拉禾为磁带而作《无韵诗》，开始与结束的和弦布局	同上	164
138	例132：萨瑞拉禾作品《烟》(*a la fumee*)总谱第1页	同上	165
139	例133：马克·安德烈·达勒巴维《王冠》(*Diademes*)总谱第9页	同上	167
140	例134：延时混响原理电路简图	Miller Puckette：*Theory and Techniques of Electronic Music*，University of California，San Diego第207页	168
141	例135：恒定匀速颤音与变速颤音	同上	168

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
142	例136：分段性延时功能·马的牙龈包络图	同上，P206	169
143	例137：格瑞瑟《起源》延时处理	总谱第31页弦乐组部分	170
144	例138：格瑞瑟《起源》协和序进	总谱第24页弦乐组部分	171
145	例139：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第1页		174
146	例140：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第1页前五小节缩谱		175
147	例141：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第2页		176
148	例142：缪哈耶作品《瑟弘迪》总谱第2页缩谱前四小节		177
149	例143及例143续一、二：菲利普·宇海勒在作品《形象》的模糊处理	总谱第1、2、3页	178 179 180
150	例144：菲利普·宇海勒《形象》节奏归类缩谱	总谱第1页	180
151	例145：菲利普·宇海勒《形象》节奏归类缩谱音色分配图	同上	181
152	例146：格瑞瑟《起源》总谱第8页弦乐组部分		183
153	例147：格瑞瑟《起源》各声部节奏发音点数统计图	总谱第26页	184
154	例148：缪哈耶《瑟弘迪》	总谱第9页	185
155	例149：缪哈耶《瑟弘迪》总谱第9页第3—5小节实音缩谱		186

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
156	例 150：时间·频率二维频谱图	Visualization of Multi－Part Music（Acoustics and Perception）	193
157	例 151：利盖蒂《分歧》(*Rami fications*)曲式布局第一部分（第 1—54 小节）	总谱，Sikorski 出版社 1968 年版	194
158	例 152：利盖蒂《分歧》曲式布局（续）第二部分（第 55—119 小节）	同上	195
159	例 153：利盖蒂《分歧》第 1—2 小节缩谱		195
160	例 154：利盖蒂《分歧》第 1—3 小节频谱呈现		196
161	例 155：利盖蒂《分歧》（第 1—8 小节）节奏发音点布局		196
162	例 156：利盖蒂《分歧》第 20—30 小节频谱变化图		197
163	例 157：利盖蒂《分歧》第 34—44 小节频谱变化图		198
164	例 158：利盖蒂《分歧》第 48—58 小节频谱变化图		199
165	例 159：利盖蒂《分歧》第 71—79 小节频谱变化图		199
166	例 160：利盖蒂《分歧》第 95—105 小节频谱变化图		200
167	例 161：利盖蒂《分歧》第 106—119 小节频谱变化图		200
168	例 162：徐孟东《远籁》的整体波形频谱图	根据人民音乐出版社 2011 年版总谱，音响分析	204
169	例 163：徐孟东《远籁》起句 201 毫秒处频谱图取样分析		205
170	例 164：徐孟东《远籁》十种声音状态频谱图取样分析统计数据		206

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
171	例165：徐孟东《远籁》第四与第六部分对比频谱图		208
172	例166：十二基音泛音矩阵		212
173	例167：第二交响乐《台风》原始和弦设计		213
174	例168：调整倍频和弦高音声部微分音下行的和弦模式		215
175	例169：高音声部微分音下行的矩阵和弦模式		216
176	例170：排列组合节奏		217
177	例171：排列组合节奏纵向分离构成自旋律声场		217
178	例172：排列组合节奏的进一步繁化		218
179	例173：奇偶矛盾节奏		219
180	例174：不协和节奏	总谱第171—174小节打击乐部分	219
181	例175：打击乐对位节奏	总谱第390—403小节打击乐部分	220
182	例176：超强台风“桑美”2006年8月10日登陆东南示意图	百度百科（http：//baike. baidu. comview951. htm）	221
183	例177：台风成长	第二交响乐《台风》总谱第16页	224
184	例178：台风突进	第二交响乐《台风》总谱第17页	225
185	例179：台风旋转扫荡	第二交响乐《台风》总谱第22页	226
186	例180：《*Duet for violin and zheng*》筝的定弦	总谱，Sikorski出版社1989年版	229

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
187	例181：二重奏乐谱材料呈述	同上，总谱第1页	231
188	例182：二重奏·九声音阶		231
189	例183：以D为中轴构成的镜像对称		232
190	例184：以八分之一为最小单位的四十八平均律数字对称图		233
191	例185：纯音震动产生的三角面域		236
192	例186：八度等边三角形		236
193	例187：八度等边三角形·边长分为二份·三全音量化面域		237
194	例188：八度等边三角形·边长分为四份·小三度量化面域		237
195	例189：八度等边三角形·边长分为八份·四分之三度量化面域		238
196	例190：八度等边三角形·边长分为十六份·八分之三度量化面域		238
197	例191：八度等边三角形·边长均分五份·一又五分之一音素量化面域		239
198	例192：八度等边三角形·边长奇数划分得到不等边三角形量化面域		239
199	例193：四面体三角形谢尔宾斯基“垫片”量化体域		240

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
200	例194：陈晓勇钢琴小品《日记I》第一首《上发条的小鸡》核心材料体现的自相似性	引自第一首《上发条的小鸡》，Sikorski出版社1996年版	241
201	例195：陈晓勇《上发条的小鸡》呈示段核心材料面域呈述		241
202	例196：陈晓勇《上发条的小鸡》派生中段演奏法二维对比		242
203	例197：陈晓勇管弦乐作品《梦的颜色》2'50″—3'50″频谱图	总谱，Sikorski出版社2008年版	244
204	例198：把例197频谱图加上网格标识线		245
205	例199：陈晓勇《梦的颜色》总谱第40—41页木管组部分	同例197	246
206	例200：陈晓勇《梦的颜色》总谱第14—15页由直达与反射构成的复杂	同上	247
207	例201：陈晓勇《漂流的颜色》总谱第45页	总谱，Sikorski出版社2006年版	248
208	例202：二胡独奏曲《江河水》第一部分慢板尾部断奏		254
209	例203：杨立青《悲歌》第62—65小节缩谱	根据上海音乐学院出版社2006年版缩谱	254
210	例204：杨立青《悲歌》第91—96小节缩谱	同上	255
211	例205：杨立青《悲歌》第219—224小节缩谱	同上	255

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
212	例 206：黄海怀版《江河水》与杨立青《悲歌》板式曲体对比图		256
213	例 207：杨立青《悲歌》衍伸结构横向旋律特征·引子部分		256
214	例 208：杨立青《悲歌》衍伸结构横向旋律特征对比图		257
215	例 209：杨立青《悲歌》乐队引子纵向和声特征		257
216	例 210：杨立青《悲歌》导入华彩第 157—162 小节织体设计	上海音乐学院出版社 2006 年版	258
217	例 211：杨立青《悲歌》尾声第 238—244 小节弦乐织体	同上	259
218	例 212：杨立青《荒漠暮色》引子中的三次点呈示	人民音乐出版社 2007 年版	260
219	例 213：杨立青《荒漠暮色》原型音列九声人工音阶	同上	261
220	例 214：杨立青《荒漠暮色》中胡主题呈现的结构动机	总谱第 13—18 小节	262
221	例 215：杨立青《荒漠暮色》中拍音型线条干涉作用	总谱第 83 小节	262
222	例 216：杨立青《荒漠暮色》中锯齿型线条干涉作用	总谱第 22 小节	263
223	例 217：杨立青《荒漠暮色》节奏取样	总谱第 57 小节	264
224	例 218：杨立青《荒漠暮色》织体肌理	总谱第 110—116 小节	265 266
225	例 219：缪哈耶《遗忘的土地》中央 C 的回音处理	同例 86	269

续表

总编号	谱例图形序号及名称	摘录出处	本书页码
226	例220：家用自备钢琴中央C的基频放大频谱图		271
227	例221：精确量化家用自备钢琴中央C的频谱分析组图一 0毫秒起点		272
228	例222：频谱分析组图二 15毫秒处离散图		273
229	例223：频谱分析组图三 35毫秒处离散图		273
230	例224：频谱分析组图四 75毫秒处离散图		274
231	例225：频谱分析组图五 165、593、673毫秒处离散图		274
232	例226：自备钢琴中央C左声道频率·振幅二维分析频谱图		275
233	例227：自备钢琴中央C左右声道频率·振幅二维动态切片分析频谱图		276
234	例228：巨人（Colossus）音源大钢琴C1频谱分析组图	根据Eastwest软件音源Colossus分析	277 278
235	例229：116－126毫秒截图大钢琴C1频率·振幅马齿龈图		279
236	例230：116－126毫秒截图大钢琴C1频率·振幅实验数据		279 280 281
237	例231：1－30号实验泛音力度分布图		282
238	例232：理论泛音与实验泛音的音高对比		283

附录八　引用作曲家作品索引

作曲家	生卒年	作品标题	创作年代	出版社	谱例号
Gérard Grisey 杰勒德·格瑞瑟	1946—1998	《起源》(*Derives*)	1973—1974	Ricordi	例 65、例 102、例 137、例 138、例 146、例 147
		《分音》(*Partiels*)	1975	Ricordi	例 40、例 48
		《调制》(*Modulations*)	1976—1977	Ricordi	例 81
		《时间的漩涡 I、II、III》(*Vortex Temporum* I—II—III)	1994/1996	Ricordi	例 58、例 64、例 92、例 93、例 94、例 100、例 121、例 125
Tristan Murail 提斯坦·缪哈耶	1947—	《忆/蚀》(*Memoire/ Erosion*)	1975/1976	Transatlantiques	例 49、例 82
		《花园秘密》(*C'est un jardin secret*)	1976	Transatlantiques	例 120
		《遗忘的土地》(*Territoires de l'oubli*)	1976/1977	Transatlantiques	例 66、例 76、例 77、例 86、例 87、例 88、例 90、例 91、例 95、例 96、例 97、例 114
		《夕阳的十三种颜色》(*Treize couleurs du soleil couchant*)	1978	Transatlantiques	例 60、例 61、例 62、例 63、例 109、例 112、例 113

续表

作曲家	生卒年	作品标题	创作年代	出版社	谱例号
		《太空》(*Ethers*)	1978	Transatlantiques	例 44
		《空间激流》(*LesCourantsde I'Espace*)	1979	Transatlantiques	例 50
		《龚德沃呐》(*Gondwana*)	1980	Transatlantiques	例 52、例 53、例 55
		《瓦解》(*Disintegrations*)	1982	Lemoine	例 45、例 47、例 79、例 80、例 83、例 84
		《瞭望》(*Vues aeriennes*)	1988	Lemoine	例 118、例 119
		《寓言》(*Allegories*)	1989/1990	Lemoine	例 122、例 123、例 124、例 126、例 127、例 128
		《瑟弘迪》(*Serendib*)	1991/1992	Lemoine	例 57、例 67、例 68、例 69、例 70、例 104、例 105、例 106、例 108、例 139、例 140、例 141、例 142、例 148、例 149
Kaija Saariaho 卡尔嘉·萨瑞拉禾	1952—	《无韵诗》(*Vers le blanc*)	1982	Wilhelm Hansen	例 131
		《威伯林根》(*Verbleiiiiungen*)	1982/1984	Wilhelm Hansen	例 130
		《亭院秘密 I》(*Jardin secret I*)	1985	Wilhelm Hansen	例 75
		《烟》(*a la fumee*)	1990	Wilhelm Hansen	例 132

续表

作曲家	生卒年	作品标题	创作年代	出版社	谱例号
Philippe Hurel 菲利普·宇海勒	1955—	《形象》(*Pour I 'image*)	1986/1987	Gerard Billaudot	例 98、例 143、例 144、例 145
Marc—Andre Dalbavie 马克·安德烈·达尔巴维	1961—	《天堂机械》(*LesParadis Mecaniques*)	1982	Jobert	例 89、例 115、例 116
		《王冠》(*Diademes*)	1986	Jobert	例 103、例 133
		《斯珂勒》(*Scuils*)	1991	Jobert	例 99
XUYI 徐仪		《虚实》(*Le plein du vide*)	1997	Jobert	例 110
Elliott Carter 卡特	1908—2012	《双重协奏曲》(*Double Concerto*)	1969		例 101
GyorgyLigeti 利盖蒂	1923—2006	《分歧》(*Ramifications*)	1968—1969	Sikorski	例 151、例 152、例 153、例 154、例 155、例 156、例 157、例 158、例 159、例 160、例 161
LiqingYang 杨立青	1942—2013	《悲歌》(为二胡与乐队,1991)	2006	上海音乐学院出版社	例 203、例 204、例 205、例 206、例 207、例 208、例 209、例 210、例 211
		《引子、吟腔与快板》(为二胡与乐队,1998)	2006	上海音乐学院出版社	
		《荒漠暮色》(为中胡与交响乐队,1998)	2007	人民音乐出版社	例 212、例 213、例 214、例 215、例 216、例 217、例 218
Xiaoyong Chen 陈晓勇	1955—	《Duet for violin and zheng》für Ensemblemusik	1989	Sikorski	例 180、例 181、例 182

续表

作曲家	生卒年	作品标题	创作年代	出版社	谱例号
		《Diary I. II. III 》für Klavier	1996—2004	Sikorski	例 194、例 195、例 196
		《Floating Colours 》für Orchester	2006	Sikorski	例 201
		《Colours of Dreams》für Orchester	2008	Sikorski	例 197、例 198、例 199、例 200
MengdongXu 徐孟东	1955—	《远籁》(为大提琴与乐队)	2009	人民音乐出版社	例 162、例 163、例 164、例 165
WuxiongXiao 肖武雄	1963—	大型室内乐《佛光穹影》	2006	上海音乐学院委约作品	例 59
		第二交响乐《台风》	2007	博士学位作品	例 166、例 167、例 168、例 169、例 170、例 171、例 172、例 173、例 174、例 175、例 176、例 177、例 178、例 179

附录九　现代声学的研究成果

次声	可听声	超声
频率：…1/10,000(万分之一)Hz—20Hz	20Hz—20,000Hz	20,000Hz—10^{12}(一千亿)Hz…[1]
声的波长：	在空气中 17 毫米—17 米 (在固体中是空气中的 N 千倍)	
声的音高感觉：	可分辨音高：1400 个可分辨响度：280 个 可分辨纯音：1400×280＝392,000(个)[2] 约 9—10 个八度，按 10 个八度计算 每个音分共含有：392,000÷(1200×10)＝32.67(个纯音/每音分) 每个半乐音共含有：32.67×100＝3,267(个纯音/一个小二度) 每个全乐音共含有：3,267×2＝6,534(个纯音/一个全音)	
声的声强感觉：	最低听阈：$I=10^{-12}$瓦/每平方米(相应的空气质点振动位移是：10^{-11}米) 最高痛阈：I＝1 瓦/每平方米，两者之比相差一千亿倍	
声音的传播速度：	在零摄氏度时，在空气中：331.45 米/秒；水中：1450 米/秒 松木：3320 米/秒；铁：5000 米/秒；云杉：5166 米/秒	

注释：

① 数据来自：中国科学院声学研究所。

② 数据来自：21 世纪高等院校优秀教材《实用语音识别基础》，国防工业出版社 2005 年版。

附录十　八度“极限”划分

一个八度共有 6 个全音　6×1=6(音数值)　共有 12 个半音　12×1/2=6(音数值)　下同

18×1/3=6　24×1/4=6　30×1/5=6　36×1/6=6　42×1/7=6　48×1/8=6

54×1/9=6　60×1/10=6　66×1/11=6　……

……

6，12，18，24，30，……48……102……204……1200 …… 6n(n∞)

1，1/2，1/3，1/4，1/5，……1/8……1/17……1/34……1/200 …… 1/n(n∞)

一全音 …… 一音分 ……极数

乐　学　　律　学　　极限认识论

附录十一 声学相关定律

1. 傅立叶定律：任何波形都可以利用许多正弦波相加来代替。换句话说，任何声音都可以分解成若干不同相位、不同振幅、不同频率的正弦波。

傅立叶转换：就是把单位时间内采集的声音（或波形）样本（通常称为“时域”），转换成若干简单振动频率的集合（称为“频域”）。

快速傅立叶转换（Fast Fourier Transform），简称 FFT。$Xn(e^{j}\omega) = \sum^{\infty} x(m)\, w(n-m)\, e^{-j\omega m}$

逆向快速傅立叶转换（Inverse Fast Fourier Transform），简称 IFFT。

离散傅立叶转换（Discrete Fourier Transform），简称 DFT。

2. 欧姆定律：1843 年欧姆提出，人耳可以把复杂的声音分解成谐波分量，并按分音大小来判断音质的理论。

3. 塞宾混响公式：1898 年通过统计分析发现声音在起振、衰减、持续、释音过程中，直达声与反射声的函数关系。

4. 小波定律：20 世纪 80 年代，法国地球物理学家 Morlet 分析人工地震勘测信号时，发现信号在低端频率具有很高分辨率的情况下，高端的频率分辨率却很低这一与时频不确定原理矛盾的现象，故而提出小波变换运算公式。它是一种多频端、多分辨率的分析方法。运用分为连续小波变换、二进小波变换、离散小波变换。

5. Wigner 分布定义：1932 年由 Wigner 提出，先运用于量子力学领域，1947 年由 Ville 因入信号分析中，并得出特征函数关系求出 Wigner 分布，简称为 WVD 分析。

6. 斯托克斯-克希霍夫公式：空气对声音的吸收与声音频率的平方成正比，频率增大 10 倍，吸收系数增大 100 倍。

7. 平方反比定律：声强与离开声源的距离的平方成反比。$I=1/r^2$

8. 惠更斯原理：波所到达的每一点都可以看成新的波源，从这些新的波源发出次波，在任一时刻这些子波的包迹就是该时刻的波前。

附录十二 声学学科范畴

声学

网络导航 专利 标准 软件 公司 企业

声的原理

声的传播

声速 声场 声的反射和折射 声的吸收和衰减 声的干涉、衍射和散射 声的共振、声的辐射 大振幅声波、非线性效应 噪声

声的合成与分析

物理声学

次声学

超声学

超声的发生 超声的传播 声光作用 超声效应 微波超声、声子声能学 超声的应用

水声学

水声传播 水中声波的散射和混响 水中声起伏 气泡、空化、湍流、尾流的声源特性 水下噪声 噪声的应用

生物声学

应用声学

语音声学 电声学 电声器件 建筑声学 医学声学 心理声学

声学工程

声学仪器

声学测量

振动噪声及其控制

振动体的振动与辐射 振动与噪声的发生 振动与噪声发生器 振动与噪声的控制及其利用

电声工程

超声工程

超声测量 超声换能器 超声控制与检测 超声的应用

水声工程

水下声源 水声材料 水声仪器和设备 水声探测 水声通讯 水

声导航

光声工程

音乐声学

后 记Ⅰ

收笔之际，几年来为本课题的研究所遭逢的苦思与辛劳都一幕幕涌现在眼前：2004年夏，我考入上海音乐学院，跟随徐孟东教授研读作曲与作曲技术理论博士学位，学习期间，徐老师始终给予我学术和人格的教导、帮助，使我受益良多。老师特有的学风、学品，言传身教于我心，将成为我以后人生道路上受用不尽的财富。

2005年开春选题就已确定，但执行的条件并不成熟，其一主要是资料极其匮乏，国内鲜见他们的总谱、音响，给研究带来极大的困难；其二是本课题是对尚在发展之中，未曾最终定型的在世作曲家的作品进行研究，其生动性、丰富性、可变性、复杂性却使我每每陷入困思之中，论文的写作因此而展现为一个不断发现、不断探索、不断修正的过程；其三是课题牵涉的学科内容较多，除了涉及音乐本体相关的内容外，还涉及数理基础、声学、电子音乐的相关知识与实践，无形中加重了研究的难度和广度。

论文得以顺利完成，主要是得益于上海音乐学院良好的学术氛围，这里有颇多才华出众、成果丰硕的先生令我可佩，他们淡泊名利，论学谈乐，博学韬钤。尽管时移世换，但这里始终是纯净淳朴、沐心修行的圣洁之地。只要一踏进校门，天灵地气通汇，心境清爽，事半功倍。这是一种高贵的精神，无形的财富，在一代一代地传承光大……让我难以忘怀的是论文的每一次修改，杨立青先生都悉心审稿，圈出不足，微观推敲，宏观把握；导师徐孟东先生逐行逐句、细致入微地考证修订。他们都是在繁重的工作之余，牺牲大量的休息时间，甚至还利用出差途中、开会间隙，尽心竭力地审阅；林华先生教导我“要入得进去，跳得出来”；朱世瑞先生指出多处失校、失注之处，很令我感愧。正因为有大师们集体智慧的提炼、升华，严格把关，才保证了本文的学术质量。对于他们，我都存有一份感激之情、珍爱之心。

论文写作期间，还得到徐仪先生、安承弼先生的大力支持，他们以身在法国，同时又是本文主要研究对象杰勒德·格瑞瑟的学生之便利条件给我提出了许多有益建议；陈晓勇先生来沪讲学之际，也数次到寒舍予我帮助解惑；还有温德青先生、伍维曦同学帮助校正了多处法文翻译；我的同

学朱琳、王安潮亦是论文的第一读者，他们的意见都对本文的写作起到不可忽视的作用。在此，一并表示感谢！

最后，我还要感谢我的父母！感谢我的女儿！父母为支持我的再度求学，不顾高龄不适的身体，义无反顾地赴宁来肩负家务，照顾女儿的起居生活，给我挤出大量时间，心无旁骛地投入研究；女儿也同样争气，学习上从来不劳我心，严于律己，亲人的支持是促使我学术上不断进步的重要动力，有了他们的支持才有呈现在此的论著。

肖武雄

2008 年 2 月写于上海音乐学院

后 记Ⅱ

学习的过程是一个唤起慧根、逐渐自醒的过程；是一个认识自己，我知我不知的过程；是一个找到学术良知，慎思审问的过程；是一个学会从自己的高度出发，去探索人生意义、关涉生命本质和人生终极奥秘的过程；是一个不断汲取到新的养分、产生新的血液、增强坚贞意志的过程；是一个抛弃复制粘贴、保持独立个性、永远探求创新的过程；是一个要耐住孤独寂寞又永不安分自闭，学习堂·吉诃德“斗风车”式的奋斗者过程；是一个不畏权术，敢为时代先的过程。本著正是这一学习过程中所结的一个果实，一种见证，它得以完成的重要原因在于一直以来有许多的良师益友对我的教育、辅助。对此，我感激在心。

23年前，我从长江分支乌江水畔来到省城贵阳，成为了贵州民族学院艺术系88级音乐班的一名学生，在清澈秀丽的花溪河畔，有一条双向平行公路，西临贵州大学，半空横跨的一座火车大桥连通河两岸的大山，桥下的一块平地就是我求学的地方——艺术系。刚恢复三年办学的校舍虽然简陋，学科建制也还不完善，但来自四面八方的老师各个满怀激情，竭心尽力、无私奉献。班主任范元祝老师用蜡笔刻版编写视唱练耳教材；李珮瑜老师惟妙惟肖地教我们演唱戏曲民歌；钢琴老师李慕兰像母亲一样关爱学生的冷暖；大提琴老师黄新达坚信我是一个以一当十的男子汉；中外音乐史老师王德勋要求我“与有肝胆人共事，于无字处读书”；和声老师姚继业勉励我在事业的道路上奋进，在神圣的乐坛上努力；作曲老师唐德松直接宣讲他在上海音乐学院学习的复调笔记；声乐老师管宾说“你是我在这三年中最难忘的一位，你的才华总有一天会不辜负你的努力，你相信这一点，我更相信这一点”；金瑞芬老师与我琴声相伴重奏合作了三年。还有在贵州师范大学讲授曲式与作品分析的崔文玉老师，对我这外校赶去的旁听生关爱有加；省音协主席雅文先生直接在他家给我加“小灶”，无偿指导我自由作曲，更把他参与“上海之春”、“中国音协”的最新信息都讲述给我这位“编外学生”，告诫我：一定要走出大山，到更加专业的音乐学院去学习！这是我从理科（数学）转业为音乐艺术，由业余爱好到专业追求的起步阶段。记得在毕业典礼上，系主任、美术家巫子强先生赠言：“你们今天毕业了，即将离开学校，踏入社会。社会是一个更大的学校，

比汪洋还宽泛。你们中有的人会找到捷径，提前上岸；有的人会找到暂时停靠的码头，补养充电；有的人会迷失方向被海水淹死，成鱼兽的快餐；有的人会坚定目标，勇往直前；有的人会习惯海洋世界，不再需要上岸……”我其实并无远谋，资质也一般，也曾想找近道上岸，但码头已经占满，不忍打乱已有的“和睦”，只得再次下海远涉，亏他们给我提供了跋涉的能源，又教会了远行的技艺，才没有遗失海底，走到今天。

17 年前，我住长江中游，又找到人生路途最重要的加油站——武汉音乐学院。在这所历史悠久、学科门类齐全、办学特色突出的高等音乐学府，不仅使我增长了专业技术知识和才干，更重要的是调整、平和了心态，成为了一个心理因素越来越健康的人。“工欲善其事，必先利其器”，技艺的提升是为学的主要目的，但是健康的心理素质与职业意识同样是谋事不可或缺的基本要求。这几方面的能力提升都得益于武汉音乐学院持续六年的学习。置身于优良的学习氛围，得到众多硕果累累而不骄，默默耕耘而无怨的知名教授和学者的教导与感化，才使我逐渐学会和掌握职业作曲家的工作方式和流程，切身体会到了学者治学应有的态度和勤勉。这其中童忠良教授大力提倡原创性，不要迷信专家，要勇于突破既有观点和形式的束缚，追求“君子不器”的思想对我影响深远；赵德义教授传授的“根音音名和声分析方法”让我受用终身；主课导师钟信明教授每周在家为我开辟音响盛宴，用他从国外进口的“先锋”音响播放他一生收集的名家名曲精粹，把家底都翻了个底朝天；高鸿祥教授悉心批改配器作业，还亲自示范电脑编配软件；教育我最长时间的彭志敏教授成为对我学术影响最大的人，他开设的课程从本科到研究生，我一门不落地全面通读，他鞭辟入里、剖析入微的分析方式，打通了我思辨的经络，逼出了我自身潜质的能源；刘建教授开设电子音乐应用课程使我眼界开阔；刘永平教授引导分析现代复调音乐使我能连通复调史几百年，朝圣经典；还有许多虽未直接授课的先生，每一次的作品点评和论文答辩都给予我醍醐灌顶的震撼。正因为有这些优秀的引路人，集体呕心沥血地教育，才使我的能力和素质得到一次全面的提升和发展。在武汉音乐学院前后受教育的六年，促使我的人生产生了质变。

10 年前，我住长江下游，有幸得到机会在有“六朝古都”之称的历史文化名城南京登陆，这里到处都有时代侵蚀的痕迹值得去揣摩、凭吊、悠然遐想……这里文学昌盛，人物俊彦，山川灵秀，气象宏伟，历来是文人墨客驻足咏叹的圣地。我来此采集帝王灵气，学习吴侬软语，感怀水乡温馨。坐落于秦淮河畔、石头城下的南京艺术学院成为我工作的地方，在这

里奉献、散播、论学、谈乐，用音符记录下生活的体验。很怀念初到金陵邹建平夫妇的问寒问暖；很怀念崔新先生领导的“六君子会战”[①]；很怀念张果君带着影视系的同学来我寒舍“蹭饭”，我们谈电影论音乐；很怀念在作曲系与乔维进、庄曜、王建民、王建元、苏青、吴小平、周扬各位同仁共事相处的每一天；很怀念南京的城墙，还有南艺校园月色撩人的夜晚，数不清的动植物合奏的心曲让我思恋……

7年前，我住长江入海口，重回大海翻腾，成为上海音乐学院博士研读学子，还是这种身份最让我适应，海阔凭鱼跃，天高任鸟飞，无拘无束，自由自在，好似进入一种超越尘世的精神境界。这主要得益于这所我国历史最悠久的高等音乐学府，历经一代又一代专家、学者的不懈努力，已经形成了一套完善的办学理念：尊重规则，崇尚创新，容许不足，鼓励冒尖，走出平庸，追求卓越，培育精英，打造精品。只要踏入校园，这里的一草一木、一颦一笑都能感化你，与贤者对话，和大师比肩，分明就是一个中国音乐思想库，促使优秀音乐人才不断涌现。院长杨立青先生在这里实施“外引内进”的政策，外聘了陈晓勇、谭盾、瞿小松、陈其钢、盛宗亮、徐仪、温德青、安承弼等名家学者；加之本院作曲系的学界精英林华、赵晓生、徐孟东、何训田、朱世瑞、贾达群、叶国辉、尹明五……使得这里储备了一大批思想迥异、才学各长的作曲家和学者，作曲领域的学术氛围格外浓烈，他们各有不同的艺术追求，有的要复杂，有的要简单，有的要砸烂西方“四大件”的禁锢，有的要以生命维护“四大件”的威严，还有的要非中、非西、非学院、非民间，有的说这是一派胡言……身在这种氛围之中，你能不去思考自己应该怎么办？正是在这种环境里催生了本书稿的雏形，这里的点点滴滴都让我珍爱永远！

3年前，我跨越长江，来到“首善之都”北京，天圆地方，中轴对称向外延伸，二、三、四、五、六环布满高楼，却像海市蜃楼，看得见、摸不着、住不起。以出世的精神，做入世的事业，这里有最佳的实现平台，与现代大都市的王气、霸气，人气、才气，天地合一。因而天南地北、五湖四海的仁人志士向这里簇拥，我随行而至。庆幸的是首都师范大学音乐学院的杨青院长接纳了我，使我变成“新的北京人”。家基太浅，扎不下根，不得不忙于奔命。惭愧！学术领域欠收成，只能在博士成果上羞羞答答地补遗，断断续续地延伸。这期间各兄弟院刊的编辑成为我最好的导师，他们教我如何规范绘谱行文，如何修正文中错误和纰漏。以文会友结下的情谊弥足珍贵，以友辅仁才使本书得以付梓。在此，我要感谢《音乐艺术》的资深编辑洛秦、范德进先生；《中央音乐学院学报》的杨民康教

授，王璐、萧琳编辑；《黄钟》的田可文教授、刘莎编辑；《中国音乐》的赵志扬教授；《天籁》的姚盛昌、郭树群、吴新伟教授；《乐府新声》的范哲明、王进教授；《音乐与表演》的居其宏、伍国栋、冯效刚教授；《人民音乐》的张萌主任、荣英涛编辑等诸位先生。感谢首都师范大学音乐学院杨青领导的集体及学术委员会的全体同仁，是他们的帮助和支持，专著才能最终完成并入选学院“十二五成果”；感谢主管科研的王文副院长、宋晶老师对文稿的后续帮助。最后，还要感谢来自各方的学子给予我三尺讲台授业交心。

肖武雄

2011 年 5 月 27 日于北京海淀田村

注释：

① 朱昌耀、崔新、杜小甦、王爱康、庄曜、肖武雄战酷暑、抢时间为南京承办的“中华人民共和国第六届残疾人运动会开幕式谱曲”。

后 记Ⅲ

一部著作，三个后记，本身就是一个奇怪的现象。通过它可以验证两点：其一，本专著已有时机无限接近付梓，然而又转折修订；其二，记录了每一次修订的心路历程与艰辛，著书立说是一个不敢马虎的事情。我本无此境界与自觉，只因迎上个好时代，国泰民安，文兴经强。专著先后得到校、市、教育部、国家社科基金资助，层层深入，步步推进，才得以完成呈现于此的文稿。这并非说它已经完美，相反，尚存有不足，只因受设备和实验条件的限制，心有余而力不足，文中提供的实验数据仅是建立在软件分析的结果。倘若再有硬件及条件更加完善的实验室支持，数据的科学性、前沿性、可辨性还会有大的提升。

持续数年的研究带给我最大的紧迫意识在于：科学原理也是艺术创新与表达的重要途径，求真的科学与求美的艺术相辅相成，互相促进。频谱音乐就是艺术科学的一种形式，未来的艺术科学前景会更加广阔。为此，我们的教学体制需要迎合时代，先破再立，加速转型，使学生冲破传统“四大件”的束缚，尽早掌握音本体与音乐科技所需的学识和技艺，借用现代的手段来提高学习的效率。

本专著若能唤醒一点意识，触发一些行动，实乃著者心愿！

感谢我的贤妻王菲给予的支持与帮助！亲情、友情、爱情贯穿著书的始终，给予我用之不竭的动力。

肖武雄

2013 年 8 月 31 日于北京海淀牡丹园

书名
前言
目录
é??a　à í???¨?£ó???ó?
µ ú ò???　?µ?×?ù ′?
1.1　?µ?×????
1.2　?µ?×ó?í?µ?D?o??ú è Y
1.3　D-o í?á 11
1.4　ê ±??1y?é D?
µ ú?t??　·o ò?µ?×÷ó?
2.1　·o ò?ó?D32¨?µ á D
2.2　??ê y±?ò?á D
2.3　ê µ?é ·o ò?
2.4　12??·?·o ò?ó??ê ê y·o ò?
2.5　?¢·?ò?µ?3???ì ??t
µ ú è y??　ò?à?µ??á 11 á|ò ò??
3.1　X?á µ?2?ê y
3.2　Y?á µ?2?ê y
3.3　Z?á µ?2?ê y
µ ú????　?µ?×ò?à?µ?ò?????2?
4.1　?y?ò 2¨?¢?a3Y2¨ ò???ê y á D
4.2　·?2¨?¢ è y??2¨ ò???ê y á D
4.3　??3?2¨ ò???ê y á D
4.4　12??·?ò???ê y á D
4.5　è?1¤?é ±?ò???ê y á D
4.6　??ò?
µ ú????　?µ?×ò?à?µ?é ù ò?o?3 é?
-à í
5.1　?-D?o?3 é
5.2　±?D?o?3 é
D??á
?D?a　?á 11D?ì?ó??-?ò
µ ú á ù??　?µ?×ò?à?µ?Dy?é D?ì?
6.1　é???D í Dy?é
6.2　?±??D í Dy?é
6.3　??ò?D í Dy?é
6.4　?a3YD í Dy?é

6.5 ?× ì YD í Dy? é
6.6 ′?×′Dy? é
6.7 o?×YDy? é
µ ú???? ?µ?× ò ? à ?µ?o í ? ò ?¨11
7.1 ±??µo í ? ò
7.2 ???µo í ? ò
7.3 ??D32¨o í ? ò
7.4 o í ? ò á ?? ó µ????- ò à ?Y
µ ú °??? ?µ?× ò ? à ?µ??′µ÷ ì ??÷
8.1 ó é ?? é ù113 é µ??£ · ??′µ÷
8.2 ó é 12? ù113 é µ??§ é ù ?′µ÷
8.3 ó é ?-? · 113 é µ??′µ÷
8.4 ò ? é ??′µ÷
8.5 ?¯o á ?a×Yµ??′µ÷
8.6 ?ù ? ê ?′µ÷
8.7 ? à ???′µ÷
8.8 ? · è ?113 é µ??′µ÷
µ ú???? ?µ?× ò ? à ?µ?? ú ê ??-? ò
9.1 ê ±??1y? é D?
9.2 ×?? ò · ±?3 ó ?×?? ò ???µ £ ¨ × è
?? £ ??-? ò
9.3 ? é ? ¤ 2a ó ?2?? é ? ¤ 2a?-? ò
9.4 D-o í D ò ???-? ò
µ ú ê ??? ?ú × à 2? ê y
µ ú ê ? ò ??? ?µ?× ò ? à ?µ????÷?-?
ò
11.1 ADSR?-? ò
11.2 D-o í D ò ???-? ò
11.3 ? £ oy?-? ò
???a ?- à í ?? ó ? ó ? ê µ ? ù
µ ú ê ??t?? ?? à ???µ ù ?a? ò à ?? ó ?
?×÷?? · ???? · µ??µ?× · ???
µ ú ê ? è y?? ? ù ó ú D ì ????1 ü ? ò ×÷?
· ?????¥? · µ??µ?× · ???
µ ú ê ????? D¤??D?µ ú ?t??? ì à ??
? ì ¨ · ?? · µ? ° ? í · é è ??
µ ú ê ????? ? ì ? ò ?D µ?? è D ò £?? è D

ò ?D µ ??TD ò ?a?a??3??t ó ? ò ? à ?× ÷ ?
· ì ???µ ?× é ? ¯ ?-? ò
µ ú ê ? á ù ?? ó é ?? á ¢ ? à è y2?o ú ? ù ó
? à ?? ó × ÷ ? · ? ' ??1 ü ? ò ? ¯ ó ???µ ?± ??
¨
µ ú ê ????? ò ??? ò ? ò y?e µ ???? ü
? á ??
? ÷ ò a2???× ê á ?
???? ò ? é ù ò ?o?3 é ?? ê ?
?????t ? à 1?????1? ê ?
???? è y ê µ ? é ê y?Y
?????? ??? ì à ?? ÷ ? µ ?× í ?
?????? à ?? ÷ µ ??? ò a? µ ? ê · ?? § ± í
???? á ù ê ??t??? ù ? é ? ÷ ? é ò ? µ ?? µ ?
ê
?????? ?× à y í ?D?? ÷ ò y
???? ° ? ò y ó ?× ÷ ? ú ? ò × ÷ ? · ? ÷ ò y
?????? ?? ' ú é ù ? § µ ??D??3 é 1?
???? ê ? ° ?? è ? ° ???T?± ?? · ?
???? ê ? ò ? é ù ? § ? à 1?? ¨ ? é
???? ê ??t é ù ? § ? § ?? · ?3?
o ó ?? ¢ ?
o ó ?? ¢ ò
o ó ?? ¢ ó